

필로티형 고층 RC건물의 비선형시간이력해석

Non-linear Time History Analysis of Piloti-Type High-rise RC Buildings

고동우¹⁾ · 이한선²⁾

Ko, Dong-Woo · Lee, Han-Seon

국문 요약 >> 강한 지진에 대한 필로티형 고층 철근콘크리트 건물의 거동을 묘사하기 위한 해석기법의 개발과 성능평가를 위해, 상부벽식 하부 골조형식인 필로티형 건물에 대한 1/12축소 진동대 실험결과와 OpenSees를 이용하여 실험모델에 대한 비선형 시간이력해석을 수행한 결과를 비교하였다. 하부골조 형식은 모두 골조로 이루어진 형태(BF)와 전단벽이 한쪽 외부골조에 치우쳐 비틀림이 발생하는 형태(ESW)의 실험체에 대해 해석연구를 수행하였다. 철근과 콘크리트의 응력-변형률관계를 정의한 후 이를 단면에 이식시킨 섬유모델을 통해 비선형거동을 나타내도록 하였으며, 벽체는 MVLEM모델을 이용하였다. 해석결과 본 논문에서 제시한 비선형 모델은 필로티층의 거동(예를 들면 필로티층의 항복강도와 강성 상부구조물의 흔들림, 거동, 그리고 축력의 변화에 따른 축강성과 전단강성의 변화)을 비교적 정확하게 묘사하였다. 그러나 MVLEM으로 벽체의 비선형거동을 구성한 결과 거시거동은 실제 모델을 잘 따랐으나, 비틀림이 주된 진동 주기일 때 발생하는 벽체 횡강성의 급격한 증가와 Warping현상으로 인해 코너기동에 발생하는 과도한 인장력은 제대로 반영하지 못하였다. 비선형 해석으로 설계부재력을 구할 경우 실제보다 약 20~30% 작게 나타났는데, 이는 실험과 해석방법의 차이때문에 발생한 것으로 보이며, 비선형 거동이 과도하게 발생한 수준의 지진에 대해서는 필로티형 건물의 거동특성을 충실히 나타내었다.

주요어 필로티형 고층 철근콘크리트 건물, 비선형 시간이력 해석, OpenSees, 섬유모델, MVLEM

ABSTRACT >> Two types of piloti-type high-rise RC building structures having irregularity in the lower two stories were selected as prototypes, and nonlinear time history analysis was performed using OpenSees to verify the analysis technique and to investigate the seismic capacity of those buildings. One of the buildings studied had a symmetrical moment-resisting frame (BF), while the other had an infilled shear wall in only one of the exterior frames (ESW). A fiber model, consisting of concrete and reinforcing bar represented from the stress-strain relationship, was adapted and used to simulate the nonlinearity of members, and MVLEM (Multi Vertical Linear Element Model) was used to simulate the behavior of the wall. The analytical results simulate the behavior of piloti-type high-rise RC building structures well, including the stiffness and yield force of piloti stories, the rocking behavior of the upper structure and the variation of the axial stiffness of the column due to variation in loading condition. However, MVLEM has a limitation in simulating the abrupt increasing lateral stiffness of a wall, due to the torsional mode behavior of the building. The design force obtained from a nonlinear time history analysis was shown to be about 20~30% smaller than that obtained in the experiment. For this reason, further research is required to match the analytical results with real structures, in order to use nonlinear time history analysis in designing a piloti-type high-rise RC building.

Key words piloti-type high-rise RC building, non-linear time history analysis, OpenSees, fiber model, MVLEM

1. 서론

최근 20년간 우리나라의 대도시 지역에서는 인구가 지속적으로 증가함에 따라 대지를 효율적으로 활용해야 할 필요성이 대두되어 상층과 하층에 다른 용도를 가진 복합용도의

건물이 빈번하게 건설되고 있다. 또한, 일반 주거용으로만 사용되는 아파트의 경우도 단지 내 공원을 조성하거나 주차 공간을 확보하기 위하여 입체적인 단지계획을 필요로 하고 있다. 이와 같은 요구사항을 만족시키기 위해 저층부의 구조형식은 보와 기둥을 사용한 골조형식으로서, 주거용도로 활용하기 위한 내력벽 형식의 상층부와는 다른 구조시스템을 적용하고 있다. 이러한 구조형식을 가진 건물은 대체로 상층부 벽이 하층부에서 중단되면서 저층부에 연층(Soft Story)과 약층(Weak Story)을 가지는 수직 비정형에 해당하며, 하층부의 벽배치가 비대칭인 경우 큰 비틀림을 받게 된다.

¹⁾ 정회원·제주대학교 공과대학 건축학부 전임강사
(대표저자: dongwko@cheju.ac.kr)

²⁾ 정회원·고려대학교 공과대학 건축사회환경시스템공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 9. 8 / 수정일 : 2009. 1. 29 / 게재확정일 : 2009. 1. 29)

이상과 같은 건물들의 지진에 대한 거동과 그 성능을 파악하기 위한 진동대실험 연구와 비선형 정적해석 연구는 이미 수행되었다.⁽¹⁻⁴⁾ 필로티형 건물을 선정하여 1/12축소 진동대 실험을 수행함으로써 지진발생 시 이와 같은 유형을 갖는 건물의 전체적인 거동특성과 중요부재의 거동특성을 파악하였으며, 비선형 정적해석 연구에서는 실험에서 나타난 전체적인 거동양상과 비선형 정적해석 결과를 비교함으로써 해석방법을 검증하고, 해석결과를 바탕으로 건물의 연성, 초과강도 및 파괴양상을 비교하였다. 지금까지 대부분의 기존 또는 지침에서는 탄성해석을 통하여 건물을 설계한 후 비선형 정적해석을 이용하여 설계된 건물의 성능을 평가하여왔다. 그러나 비선형 정적해석의 경우 단조증가 하중을 채택함으로써 시시각각 변하는 지진하중과는 다를 수 있고, 고층건물에서 발생할 수 있는 고차모드의 영향을 반영할 수 없다는 취약점을 갖고 있다. 근래 구조 부재의 비선형 거동을 묘사하기 위한 알고리즘이 많이 개발됨과 동시에 컴퓨터의 속도도 크게 빨라짐에 따라 세계적으로 고층 건물을 설계할 때 비선형 시간이력해석을 수행하는 것을 요구하는 추세이다.^{(5),(6)}

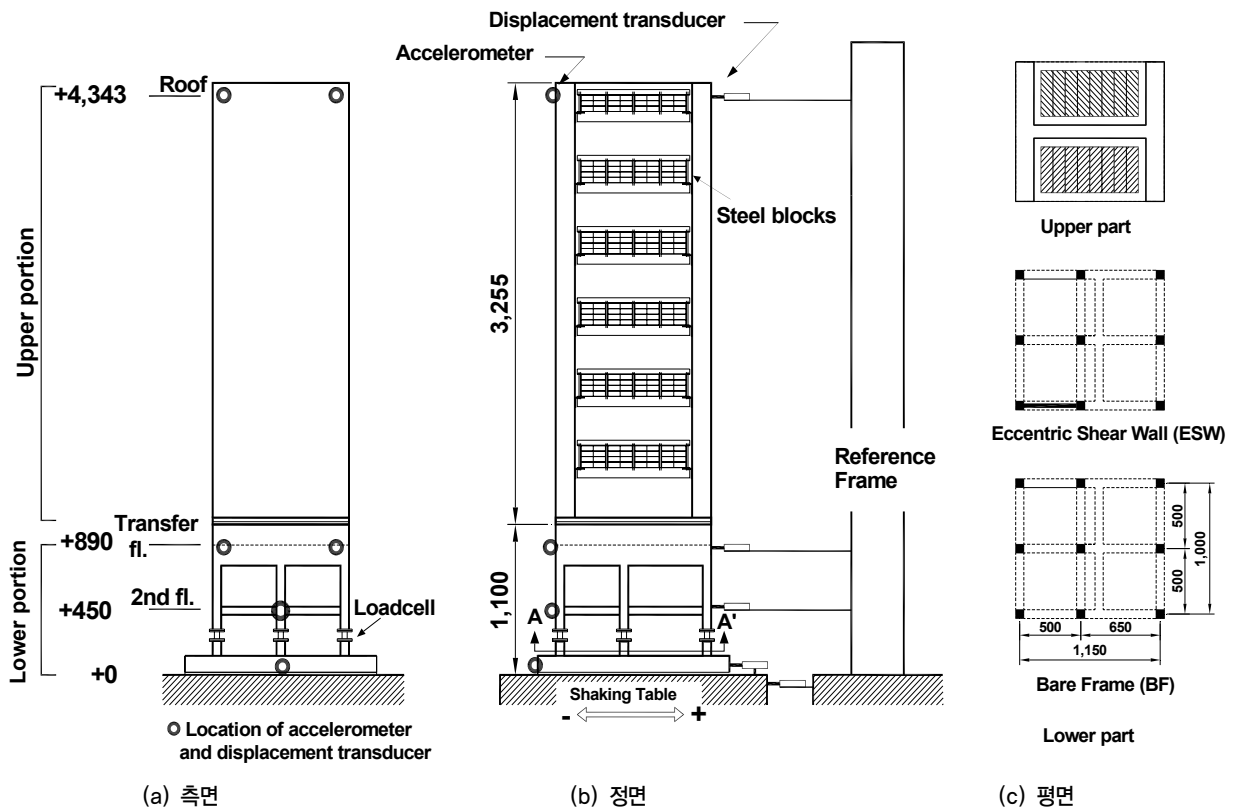
따라서, 본 연구에서는 OpenSees⁽⁷⁾를 이용하여 진동대 실험이 수행되었던 건물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행한 후, 비선형 시간이력해석 결과와 진동대실험 결과를 비교하였다. 이 과정을 통해 필로티형 RC 건물의 비선형 해

석모델의 수립방법을 검증하고, 이와 같은 해석모델의 한계와 문제점을 밝히고자 한다.

2. 비선형 해석모델

그림 1은 선정된 건물을 1/12로 축소하여 진동대 실험을 수행한 실험체로서, 비선형 해석모델은 실험체의 거동을 최대한 가깝게 묘사할 수 있도록 하였다. 대상건물의 설계에 대한 자세한 내용은 기존 연구⁽¹⁻⁴⁾에 자세히 언급되었으나, 다시 간단히 소개하면 다음과 같다.

현재 우리나라에서 건설되고 있는 주상복합 건물에 대한 사례를 조사한 후⁽⁸⁾, 하부골조는 양방향 2층 2경간으로 구성되고 상부 벽식부분은 15층으로 이루어진 건축물을 대상 건물로 선정하였다. 대상건물에 대해 MIDAS GEN⁽⁹⁾을 사용하여 해석을 수행하고, 우리나라 하중기준⁽¹⁰⁾에 따라 설계하였다. 하부골조의 보와 기둥은 보요소, 상부벽 부분은 벽요소를 사용하였으며, 부재의 단면특성은 전단면을 무균 열 상태의 단면으로 보고 프로그램에서 자체적으로 계산된 값을 사용하였다. 고정하중은 대상건물의 골조에 대한 자중만 적용하고, 활하중은 1.96kN/m^2 를 적용하였다. 지진하중에 대해서는 우리나라의 하중기준에 따라 아래와 같이 등가 정적해석법에 의한 밀면전단력을 구하여 해석을 수행하고,



〈그림 1〉 실험체의 평면과 입면

이때 우발편심은 5%를 적용하였다.

$$V = C_s \times W = \left(\frac{A I_E C}{R}\right) W = (0.048) \times (23,770) = 1,135k \quad (1)$$

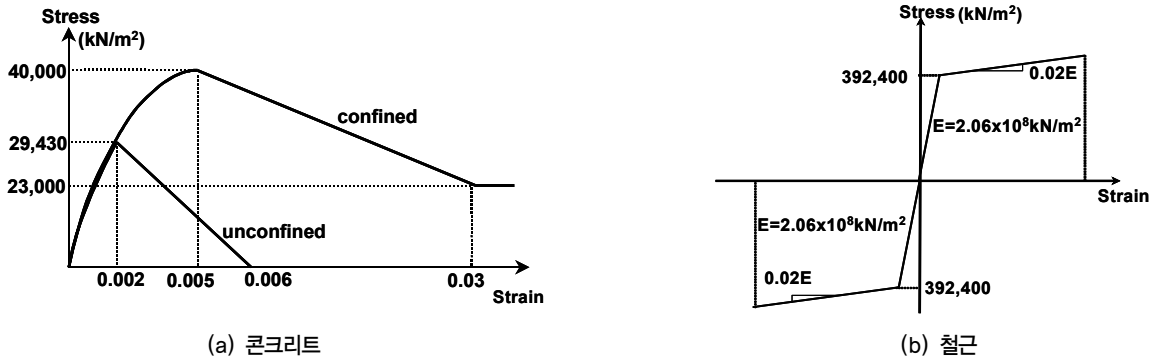
$$C = \frac{S}{1.2 \sqrt{T}} = 0.868 \quad (2)$$

$$T = 0.0488 (h_n)^{(3/4)} = 0.920 \text{ 초} \quad (3)$$

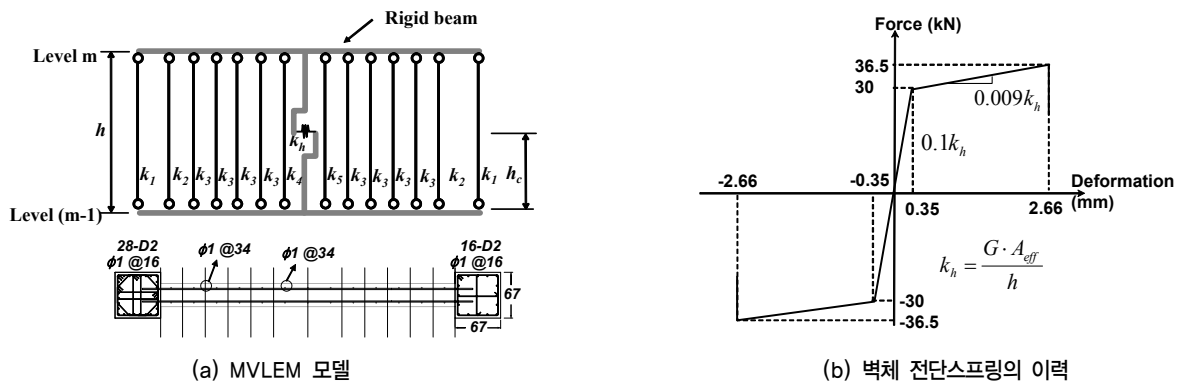
여기서, h_n 은 건물의 높이, W 는 건물의 중량, A 는 지역계수로서 0.11, I_E 는 중요도계수로서 1.5, S 는 지반계수로서 1.0, R 은 반응수정계수로서 기타구조에 해당하는 3.0을 각각 적용하고, 고유주기(T)는 기타 구조의 고유주기 산정식을 사용하여 0.920초이며, 밀면전단계수 C_s 는 0.048이다. 비선형 시간이력해석을 수행하기 위한 프로그램으로는 비선형 정적 해석을 수행한 프로그램과 동일한 OpenSees⁽⁷⁾를 사용하였다.

그림 2에 나타난 콘크리트와 철근의 물성을 섬유모델에 적용함으로써 비선형 거동을 묘사하도록 하였다. 기둥부재의 경우 1개층 기둥을 비선형섬유가 이식된 5개의 비선형 요소로 모델링 하였으며, 보부재는 양단에 비선형거동을 묘사하는 섬유모델을 적용하였다. 특히, 기둥의 경우 구속효과를 나타내기 위하여 기둥 코어부분에 대해서는 Paulay와 Priestley가 제안한 방법⁽¹¹⁾에 따라 구속된 콘크리트의 응력-

변형률관계로 정의된 콘크리트 요소를 섬유모델에 적용하였다. 단, BF의 경우 진동대 실험 이전에 갑작스런 진동대의 오작동으로 인해 실험체에 손상이 가해져서 Taft030 직전에 측정된 고유주기에 근접하도록 철근의 탄성계수를 1/2로 낮추고, 최대 응력 시점과 파괴 시점에서 콘크리트의 변형률을 각각 1.6배 크게 조정하였다. 벽체는 최근 벽체의 이력모델로 많이 제안되고 있는 MVLEM(Multiple Vertical Line Element)⁽¹²⁾을 적용하였다. MVLEM에서 벽체를 이루는 각각의 수직 트러스 요소는 그림 3 (a)에서 보듯이 벽체의 각 부분을 철근과 비구속콘크리트로 이루어진 섬유모델로 이루어진다. 이 섬유모델을 통해 각 트러스의 축강성이(k_n)이 정의되어 벽체의 축강성과 휨강성을 나타낸다. 그리고 벽체 중간높이에 벽체의 전단변형을 묘사하는 전단스프링(k_h)을 두었는데, 이 강성은 기존 실험연구⁽¹³⁾에서 나타난 전단벽의 횡하중-전단변형의 관계로부터 벽체의 항복 전과 후의 전단강성, 그리고 전단연성을 추정하여 적용하였다. 이로부터 구한 전단스프링의 전단력-전단변형의 관계는 그림 3 (b)와 같다. 해석에서 발생할지 모르는 오류와 해석시간을 줄이기 위하여 하부골조 부분은 상세히 모델링한 반면, 상부 벽체 부분을 나타내는 부분은 하부골조부분보다 강성이 10배 큰 강체 골조로 모델링하였다. 보와 기둥이 만나는 접합부의 경우도, 상세하게 해석모델을 수립할 경우, 오히려



〈그림 2〉 콘크리트와 철근의 응력변형률 관계(ESW)



〈그림 3〉 벽체의 해석모델

해석상 오류가 발생할 것으로 예상되어 보-기둥 접합부는 강체로 해석모델을 수립하였다. 또한, 대상건물의 경우, 고층건물이라는 하지만 하부층의 강성이 상부층보다 크게 떨어지므로, 각방향으로 1차모드가 거의 지배할 것으로 예상되었다. 따라서, 구조물의 시간이력해석 시 큰 영향을 미치는 감쇠율은 통상 비선형거동을 하는 철근콘크리트 건물에 적용하는 것과 동일하게 모든 진동모드에 대해 5%를 적용하였다.

3. 실험과 해석의 상관성

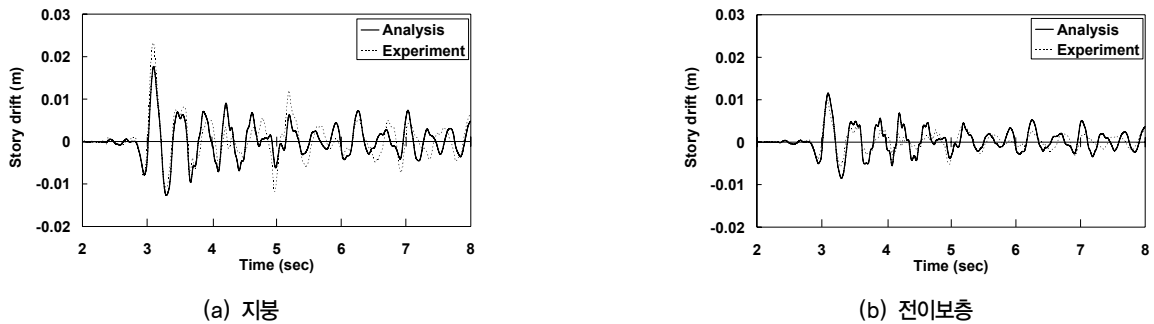
해석에서 사용한 지진파는 실험에서 사용한 것과 동일한 TaftN21E파로서 최대지반 가속도를 0.11g부터 시작하여 0.22g, 0.3g, 0.4g, 0.6g, 0.8g로 서서히 증가시키면서 진동대 실험을 수행하였다. 실험체의 무게를 요구중량의 1/2로 줄였기 때문에 상사성의 원리에 따라 최대가속도가 0.3g인 Taft030이 설계지진수준이고, 0.8g인 Taft080은 강진지역에서도 드물게 발생하는 지진수준에 해당한다. 본 연구에서

는 비탄성거동이 뚜렷하게 나타나는 Taft080의 해석과 실험 결과를 위주로 정리하였다.

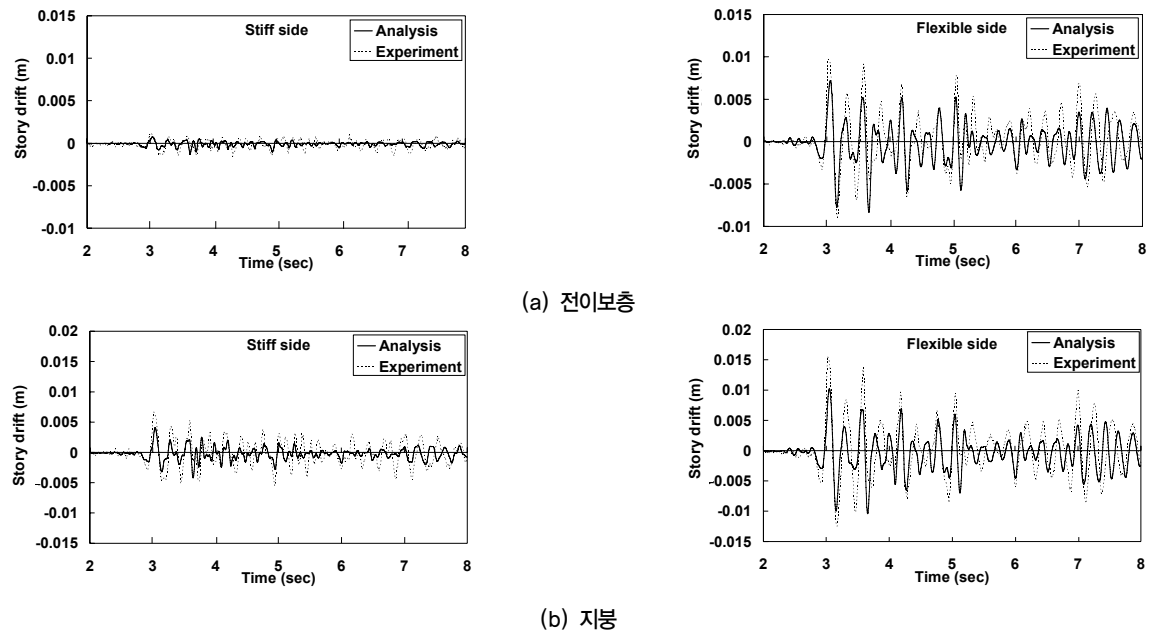
3.1 층변위비교

그림 4는 Taft080에 대해 해석과 실험결과 나타난 BF의 전이보층과 지붕변위의 시간이력이다. Taft080지진에 대한 층변위반응의 주기와 형태는 실험결과와 해석결과가 거의 비슷하였으나, 지진동이 크게 작용하는 3초 부분과 5초 부분에서 해석과 실험결과 나타난 지붕변위는 약 20% 정도 차이가 발생하였다. 반면, 전이보층 변위는 해석값과 실험값이 거의 비슷하였다. 그러나 한 차례 큰 비선형 거동이 발생한 후인 6초 이후에는 해석결과 나타난 진동주기가 실험결과보다 짧은 것으로 나타났다.

그림 5는 Taft080지진에 대한 ESW의 비선형 해석결과 나타난 강한골조와 연약골조의 전이보층과 지붕변위의 시간이력을 실험결과와 비교한 것이다. BF와 마찬가지로 비선형 시간이력 해석 결과는 강한골조와 연약골조의 전이보



〈그림 4〉 지붕과 전이보층변위의 시간이력(BF)



〈그림 5〉 층변위 비교(ESW : Taft080)

층변위를 실험결과와 비교적 정확하게 묘사하였으나, 최대 지붕변위와 연약골조의 변형량은 실험결과의 80%에 그쳤다. BF와 ESW 모두 해석결과 나타난 최대값은 20%부터 크기는 30%까지 실험결과와 차이를 보여주었으나, 변위반응이 각 주기의 최대값 근처에 도달하였을 때 나타나는 고차모드의 영향까지 비교적 실험에 근접하게 묘사하였다.

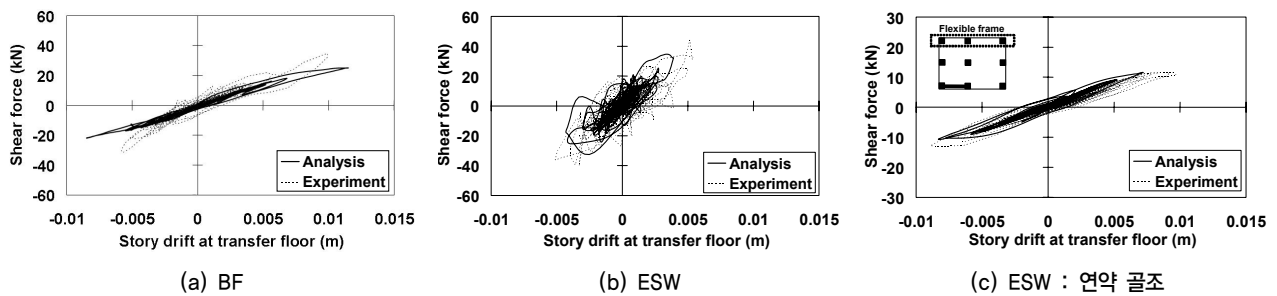
3.2 밀면전단력

그림 6 (a)와 (b)는 각각 Taft080에 대한 BF와 ESW의 전이보층변위와 밀면전단력의 상관관계이다. 해석결과 밀면전단력과 전이보층변위 각각의 최대값은 실험결과와 다소 차이가 발생하지만, 강성은 거의 일치하였다. BF의 경우, (+)방향에 대해서는 항복 후 거동도 해석에서는 거의 유사하게 반영되었으나, (-)방향의 큰 지진하중에 대해 강성이 증가하는 현상을 묘사하지 못하였다. ESW의 경우, 해석결

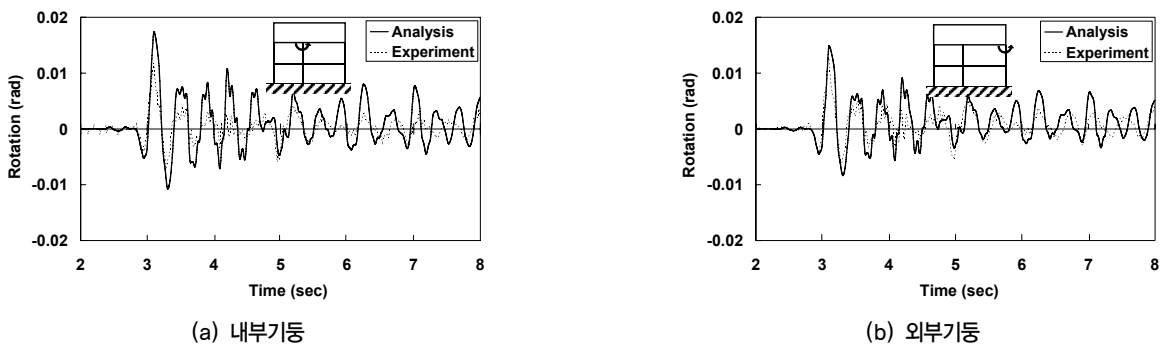
과 최대 밀면전단력은 실험에서 산출된 값보다 최대 40%까지 작게 나타났으나, 강성은 거의 비슷하였다. 그림 6 (c)는 실험과 해석결과 나타난 ESW의 연약골조에 작용하는 전단력과 연약골조의 전이보층변위의 관계로서, 탄성영역에서의 강성은 물론 항복 후 강성도 실험결과와 거의 비슷한 추세를 보여주었다.

3.3 골조부재의 거동

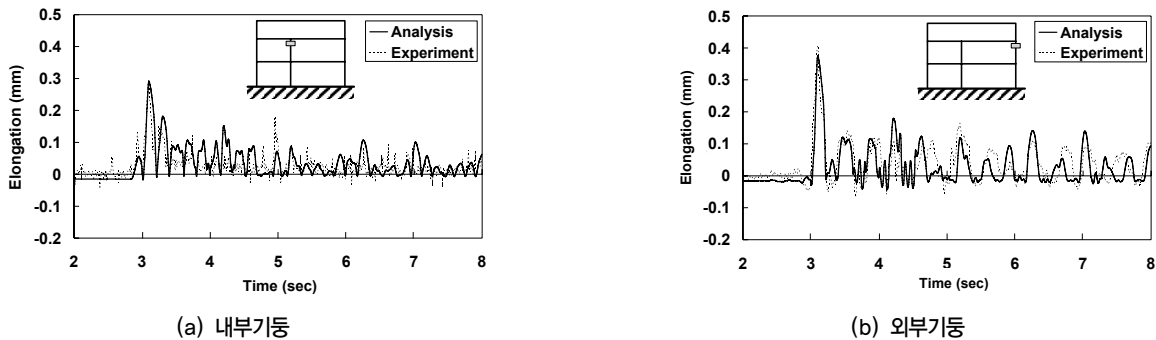
그림 7은 BF를 Taft080지진에 대해 해석을 수행하였을 때 내부기둥과 외부기둥 상부의 회전각의 시간이력을 실험결과와 비교하고 있는데, 해석결과 나타나는 전체적인 진동주기와 거동은 실험결과와 거의 비슷하나 각 진동주기의 최대값은 해석결과가 더 큰 양상을 보여주고 있다. 그리고 그림 8은 해석과 실험결과 나타난 BF의 하부골조기둥의 소성 힌지 영역에서 축변형량을 비교하고 있다. 콘크리트가 압축



〈그림 6〉 밀면전단력과 전이보층 변위 관계(Taft080)



〈그림 7〉 기둥 회전각의 시간이력(BF : Taft080)



〈그림 8〉 기둥 축변형량의 시간이력(BF : Taft080)

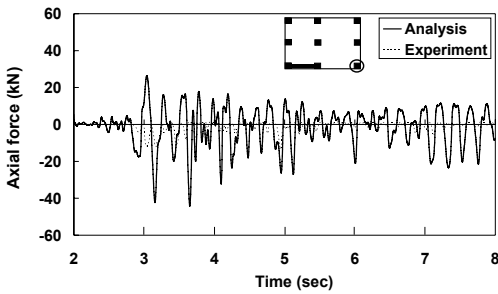
력에 대해서는 크게 기여하지만, 인장력에 대해서는 저항을 거의 하지 못하므로 실험에서는 대부분의 기둥이 인장측으로 편향된 변형이 주로 발생할 뿐, 압축변형은 거의 발생하지 않았다. 해석결과도 크기의 차이는 있으나 실험과 비슷한 현상이 그대로 나타났다. 해석모델에서 기둥 전체에 걸쳐 섬유모델로 구성된 비선형 요소를 이식하였기 때문에, 인장과 압축에 따라 축강성이 변화하는 양상을 묘사할 수 있었다. 또한 기존 실험연구⁽²⁾에서는 Taft080에 대한 실험결과 과도한 전도모멘트가 구조물에 작용함에 따라 상부구조는 흔들림거동(Rocking Behavior)을 하였고, 이는 내부기둥이 지속적으로 인장력을 받는 현상으로부터 추정할 수 있는데, 해석결과도 내부기둥의 축변형량이 실험결과와 비슷한 것으로 보아 해석에서도 실험에서와 같은 흔들림거동이 발생하였음을 추정할 수 있다.

그림 9는 ESW에서 Taft080에 대한 실험과 해석결과 나타난 각 기둥의 축력의 시간이력을 비교하고 있다. 실험에

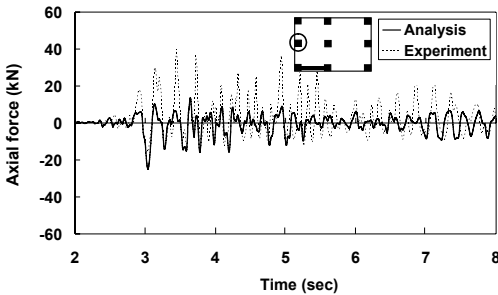
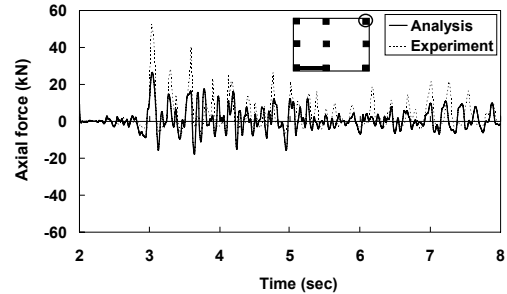
서 나타난 축력반응의 특징은 비틀림거동에 의한 Warping 현상과 지진에 직각방향으로 작용하는 전도모멘트로 인해 연약골조의 코너기둥에서 큰 인장력이 발생하고, 강한골조의 독립된 기둥에서는 지속적으로 압축력만 발생하였다. 그런데 해석결과는 강한골조의 코너기둥의 경우 압축방향일 때 하중이 크게 나타나는 편향현상은 발생하였으나 실험에서와 같이 인장력만 발생하는 것은 아니었다. 그리고 내부골조의 두 기둥과 코너기둥의 축력도 압축력은 해석결과와 실험결과를 충실히 따랐으나, 인장력을 묘사하는데 있어 해석결과가 실험결과보다 작은 경향을 띠어, 해석결과를 바탕으로 설계할 경우 연약골조 코너기둥의 인장력을 과소평가할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 비틀림거동

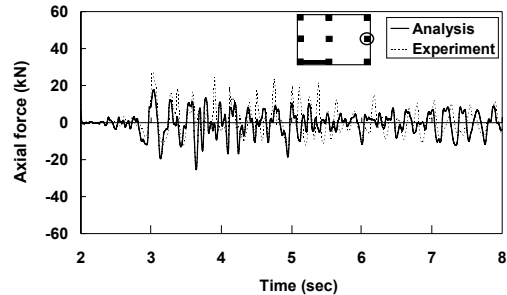
그림 10은 Taft080에 대한 해석결과 나타난 지붕과 전이



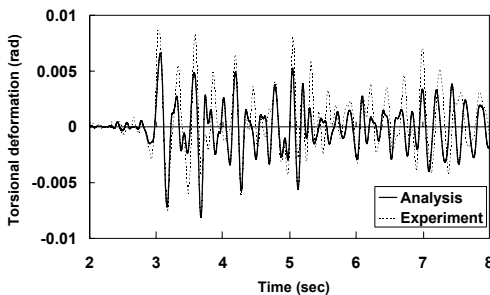
(a) 코너기둥



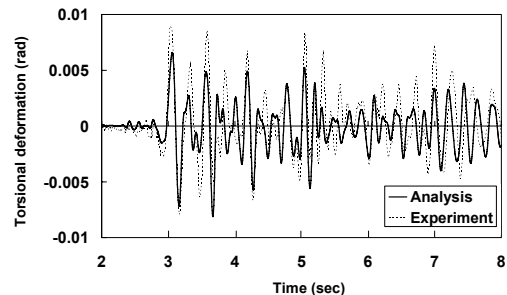
(b) 외부기둥



〈그림 9〉 기둥 축력의 시간이력(ESW : Taft080)



(a) 전이보층



(b) 지붕

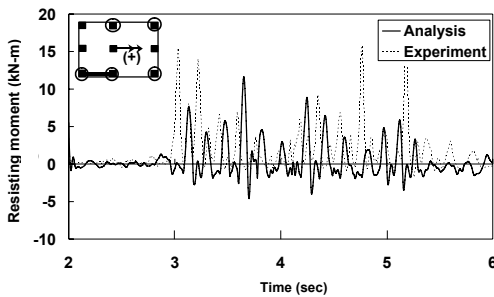
〈그림 10〉 비틀림변형각의 시간이력(ESW : Taft080)

보층에서 비틀림변형각의 시간이력을 실험결과와 비교한 그림이다. 해석결과 (-)방향 비틀림 변형각은 비교적 정확하게 묘사하고 있으나, (+)방향 비틀림 변형각은 전체적인 경향은 충실히 따르지만 최대값은 실험결과의 80% 수준으로 나타났다.

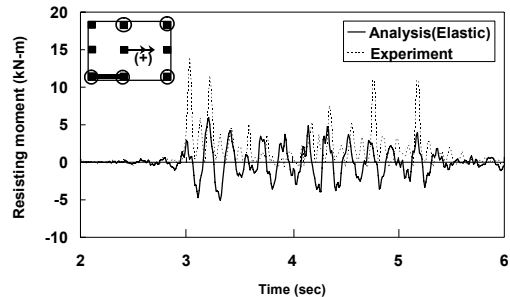
ESW에서 기둥의 축력반응으로부터 구한 지진에 직각방향으로 작용하는 전도모멘트의 시간이력을 그림 11에서 비교하였다. 실험에서는 탄성거동을 하는 Taft030에서도 직각방향 전도모멘트는 (+)방향으로 일방향성을 나타내었는데, 비선형 해석에서도 일방향성 거동을 하였다. 단, 실험에서는 (+)방향 전도모멘트가 발생하는 3.05초에서 전도모멘트가 가장 큰 것으로 나타났으나, 해석에서 나타난 전도모멘트는 거의 무시할 정도였다. 그러나 (-)방향에 대해서는 실험과 해석결과가 거의 비슷하였다. 그림 11 (b)는 SAP 2000⁽¹⁴⁾

을 이용한 탄성시간이력해석결과 나타난 직각방향 전도모멘트를 실험결과와 비교하고 있는데, 해석값이 양방향성을 보이면서 크기도 상당한 차이를 보여주었다. OpenSees에서 섬유모델을 적용할 경우, 범용 프로그램의 탄성해석으로는 묘사할 수 없는 축력의 변화에 따른 철근콘크리트 부재의 강성변화로 인한 거동의 변화를 나타낼 수 있었다.

그림 12는 ESW의 해석과 실험결과 나타난 ESW의 전도 변형각과 2층벽체 바닥의 회전각의 시간이력을 비교하고 있다. 실험결과는 전도변형각과 벽체 2층바닥의 회전각이 건물을 지배하는 진동모드가 병진-비틀림 연계모드일 때는 동일한 위상을 보이다가 비틀림모드가 지배하는 진동모드에서는 반대의 위상을 나타내었다. 반면, 해석결과는 실험에서와 같은 진동모드의 변화에 따른 벽체 거동의 변화를 찾을 수 없었다. 그림 13은 ESW의 벽체 단부기둥의 축변형량의

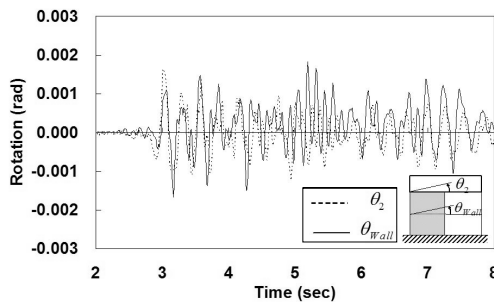


(a) 비선형 시간이력해석과 실험

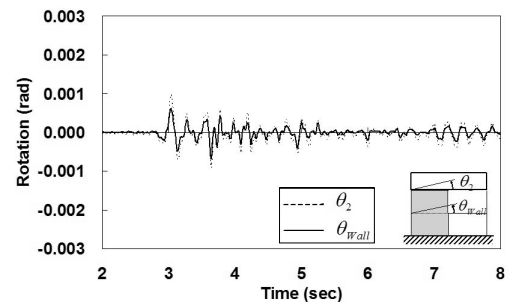


(b) 탄성시간이력해석과 실험

〈그림 11〉 직교방향 전도모멘트의 시간이력(ESW : Taft030)

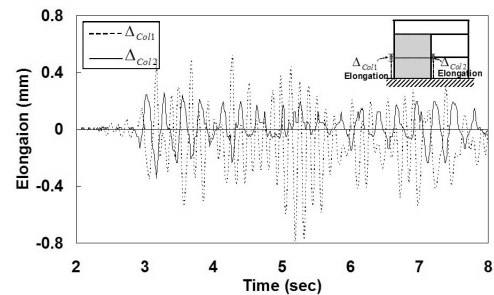


(a) 실험

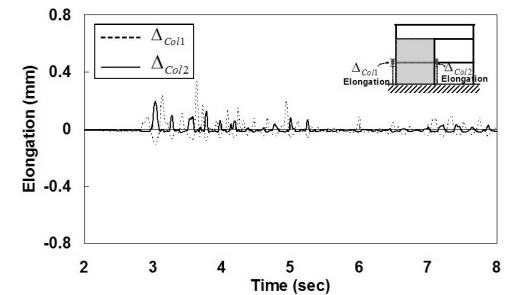


(b) 해석

〈그림 12〉 전도변형각과 벽체 2층 바닥 회전각의 시간이력(ESW : Taft080)



(a) 실험



(b) 해석

〈그림 13〉 벽체 단부 기둥 축변형량의 시간이력(ESW : Taft080)

〈표 1〉 실험값결과와 해석결과 비교표

	Model 1			Model 3						
	Story drift (mm)		Base shear (kN)	Story drift (mm)				Sear force (kN)		
	Transfer floor	Roof		Transfer floor		Roof		Bent shear force		Base shear
				Stiff side	Flexible side	Stiff side	Flexible side	Stiff side	Flexible side	
Experiment (A)	11.3	23.2	34.67	1.35	8.9	6.38	15.6	20.75	12.85	44.27
Analysis (B)	9.93	17.4	24.76	0.70	8.1	4.03	10.2	18.11	9.79	32.06
Error (= B-A /A)	0.12	0.25	0.28	0.48	0.09	0.37	0.35	0.13	0.24	0.28

시간이력이다. 기존 실험연구⁽³⁾결과 나타난 벽체단부기둥의 축변형량을 보면, 실험결과는 진동모드에 따라 단부의 축변형량의 관계가 변하고 Warping현상에 의해 코너기둥의 축변형량이 크게 나타났으나, 해석결과에서는 이와 같은 현상은 묘사할 수 없었다.

3.5 실험과 해석의 상관관계분석

시간이력해석을 구조물 설계에 반영하기에는 어떤 지진파를 이용했는가에 따라 구조물의 반응은 경우에 따라서 4배 이상 차이가 나는 경우도 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서, IBC 2000⁽¹⁶⁾ 등 대부분의 기준에서는 시간이력해석결과를 설계부재력으로 활용함에 있어 3개의 지진파를 사용할 때는 해석결과 중 가장 큰 값을 취하고, 7개 이상의 지진파로 해석을 수행할 경우에는 해석결과의 평균값을 취하여 설계한다. 시간이력해석의 특성상 어떤 지진파를 선택하였는가에 따라서도 차이가 발생하여 기준에서는 이와 같은 규정을 두고 있다. 본 연구에서는 해석모델이 실험결과와 나타난 비선형 거동특성을 얼마나 정확히 묘사하는지 확인하기 위한 것이 목적이므로, TaftN21E파에 대한 해석결과와 실험결과와 나타난 최대값을 비교함으로써 해석과 실험의 오차를 파악하였다. 표 1에서 BF와 ESW의 진동대 실험과 비선형 시간이력해석 결과와 나타난 층변위와 밀면전단력의 최대값을 비교하였다.

층변위 반응의 경우 해석결과는 ESW의 강한골조의 전이보층변위와 지붕변위를 제외하고는 실험결과의 75%~90% 정도의 값을 나타내고 있었다. 강한골조의 변위의 경우 계측장치의 유효계측범위에 비해 변위값이 지나치게 작아 오차가 크게 발생한 것으로 보인다. 밀면전단력의 경우도 해석결과가 실험결과의 76%~87%의 값으로 나타났다. 해석값이 이와 같이 작게 나타난 원인은 앞서도 언급했지만, 실험은 여러 단계에 걸친 비선형거동을 이미 수행한 뒤라서 어느 정도 손상을 입은 상태인 반면, 해석모델은 바로 Taft080에 대한 해석을 수행하여 구조물에 손상이 전혀 없는 상태였기 때문에 발생한 것으로 보인다.

4. 결론

이미 수행된 1/12축소 진동대 실험결과와 OpenSees를 이용하여 비선형 시간이력해석 결과를 비교함으로써, 해석모델 수립방법의 적절성과 설계에 적용했을 때 발생할 수 있는 문제점에 대해 정리하여 내린 결론은 다음과 같다.

필로티형 건물의 경우 큰 지진이 발생하였을 때, 하부골조의 기둥에 큰 축력의 변화가 발생하고 이는 횡강성의 변화를 초래한다. 따라서, 비선형 해석모델을 수립함에 있어 축력의 변화에 따른 거동변화 특성을 반영할 수 있어야 하는데, 섬유모델을 사용할 경우 축력의 변화에 따른 구조물 거동의 변화를 반영할 수 있었다. 그 외에도 강한 지진 시 구조물에서 발생하는 흔들림거동도 비선형 해석에서는 정확하게 묘사하였다. 벽체의 경우 MVLEM을 채택하였는데, 휨과 축력에 대한 비선형거동을 묘사하는 트러스 요소를 비선형 섬유모델로 모델링한 결과 전체적인 거동은 비교적 실험결과와 유사하게 나타났다. 그러나 비틀림 비정형인 건물에서 구조물이 손상을 입음에 따라 구조물의 지배 진동주기가 비틀림 모드로 변하는데 이때 발생하는 벽체의 복곡률거동이라든가 Warping현상에 의해 코너기둥에 발생하는 큰 인장력 등은 제대로 묘사하지 못하였다.

진동대 실험결과가 실제구조물 거동을 나타내는 것이라고 가정한다면, 비선형 시간이력해석결과와 나타난 결과는 실제 구조물의 거동의 약 70~80% 정도의 값으로 나타났다. 이와 같은 오차는 실험체는 실험의 경우 약한 지진부터 중간 지진 강한 지진을 거치는 동안 어느 정도 손상이 발생한 상태인 반면, 해석은 강한 지진만 작용하였기 때문인 것으로 보인다. 전세계적으로 비선형 시간이력해석이 건물의 설계에 도입되는 추세임을 감안할 때, 비선형 시간이력해석을 검증하고, 실제 거동과 최대한 비슷한 결과가 나오도록 하기 위한 노력이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2004

-041-D00749)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. Lee, H. S. and Ko, D. W., "Shaking table tests of a high rise RC bearing-wall structure with bottom piloti stories," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 47-54.
2. Lee, H. S. and Ko, D. W., "Seismic characteristics of high-rise RC wall Buildings having different irregularities in lower stories," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 11, 2007, pp. 3149-3167.
3. Ko, D. W. and Lee, H. S., "Shaking table tests on a high-rise RC building model having torsional eccentricity in soft lower storeys," *Earthquake Engng Struct. Dynamics*, Vol. 35, 2006, pp. 1425-1451.
4. 고동우, 이한선, "1:12 축소 비정형 고층 RC건물의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성," 한국지진공학회 논문집, 제 11권 2호, 2007, pp. 1-10.
5. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, *An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the los angeles region*, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, 2005.
6. Michael, W., Andrew, W., and Ron, K., *Recommendations for the Seismic Design of High-rise Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habit, 2008.
7. OpenSees, *Open System for earthquake engineering simulation* (*opensees.berkeley.edu*), Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2004.
8. 김상연, 이한선, 고동우, "상부전단벽과 하부골조로 구성된 복합구조의 설계실무현황 분석," 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 11권, 제 1호, 1999, pp. 223-228.
9. 마이다스아이티, *MIDAS GEN Structural Analysis Program*, 마이다스아이티, 2003.
10. 대한건축학회, *건축물설계기준*, 대한건축학회, 2005.
11. Paulay, T. and Priestley, M. J. N. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Willey & Sons, Inc. 1992.
12. Orakcal, K., Wallace, J. W. and Conte, J. P., "Nonlinear modeling and analysis of slender reinforced concrete walls," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, 2004, pp. 688-698.
13. Ilita, R. and Bertero, V. V., *Effects of amount and arrangement of wall-pannel reinforcement on hysteretic behavior of reinforced concrete walls*, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80-04, 1980.
14. Computer & Structures, Inc., *SAP 2000 Integrated finite element analysis and design of structures*, Computer and Structures, Inc., Berkeley, CA., 2000.
15. Moehle, J. P., "The tall buildings initiative for alternative seismic design," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16 No. 5, 2007, pp. 559-567.
16. International Code Council, *International Building Code*, International Code Council, 2000.