

$P-\Delta$ 효과에 의한 철골 라멘 하부층 변형집중현상 억제를 위한 SM570TMC 고강도강 혼용 사용 설계제안

김 문 정¹

현대건설(주) 연구개발본부 과장

Proposal of the Structure Design using SM570TMC for Preventing Deformation Concentration by $P-\Delta$ Effect on Lower Story in Steel Ramen

Kim, Moon-Jeong¹

¹Senior Researcher, Ph.D, R&D Group, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd, Gyeonggi-do, Korea

Abstract: Under the huge seismic loads, there are too many risks about which high-rise buildings lost their lateral stiffness caused by plasticity on frame members. Because of earthquake is important cause to bring the collapse continue to human's life, many reports examined these phenomenons in various angles. And some of them reported the high possibility about building collapse by deformation concentrations under huge earthquakes. For preventing these phenomenons, researchers suggest some items-such as adding damping devices or strengthen their ductility or stiffness. This report suggests choose the method of strengthen building stiffness and suggests the alternative designs using high strength steel-SM570TMC, and provides the results of time-history analysis about the alternative designs for investigation

Key Words: $P-\Delta$ effect, SM570TMC, seismic design, deformation concentration, alternative design

1. 서 론

2000년대 초반부터 전 세계적으로 발생한 거대 지진의 피해상황은 이제까지 지진 안전국으로 간주되어 왔던 국내에까지 경각심을 불러오게 되었다. 이에 따라 2005년 KBC(Korea Building Code) 개정에서는 미국 FEMA 및 EURO Code를 참조하여 내진설계의 기준을 대폭 강화하였고 KBC2009에서는 그 동안의 시행과정 중 애로사항을 수정하여 KBC2005에서의 미흡했던 부분 및 이해가 쉽지 않았던 부분을 국내 실정에 맞게 수정하여 반포하였다.

KBC2009는 내진설계를 위한 지진응답스펙트럼의 설정 계수 등을 국내 실정에 맞게 쉽게 설정하는 등

설계자가 쉽게 적용할 수 있게 수정이 이루어졌으나, 중저 지진지역대의 설계만을 고려하는 제한 및 내진 설계 시 부재 당 소성율을 고려하는 항목이 누락되어 있는 등 여러 가지 보완하여야 할 문제가 존재한다. 특히, 2000년대에 들어서는 국내에서도 공동주택 등 다양한 건축물이 초고층화 되어가고 있는 경향 발견 되는데, 국내 내진설계 기준은 고차모드 문제 및 $P-\Delta$ 효과 등의 고층 또는 초고층 빌딩에 대한 고려 사항이 미흡한지라 국내 기준인 진도 5를 초과하는 지진이 발생하였을 때 당해 건물에 있어 피해를 최소한으로 방지할 수 있는 수준의 내진설계는 거의 수행되지 못한 상황으로 여겨진다.

다행히 국내에서도 아이티 지진을 시작으로 동일본 대지진을 경험하면서 내진설계에 대한 국내의 인식이

주요어: $P-\Delta$ 효과, SM570TMC강, 내진설계, 변형집중현상, 대안설계

Corresponding author: Kim, Moon-Jeong

R&D Group Tall Building Team, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd, 102-4 Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 446-716, Korea.

Tel: +82-31-280-7350, Fax: +82-31-280-7678, E-mail: moonjeong.kim@hdec.co.kr

투고일: 2012년 8월 3일 / 수정일: 2012년 9월 6일 / 게재확정일: 2012년 9월 10일

변화하기 시작해, 많은 연구기관에서 이전까지 관심을 두지 않았던 댐퍼의 개발에 착수하거나 관련 신기술을 발표하는 등의 노력을 기울이고 있다. 또한 내진설계 자체에 있어서도 지진이 발생하였을 경우 건축물의 거동을 비교적 가장 정확하게 예측할 수 있으나 이전까지 내진해석에 있어서 해석 시간 및 투입 노력을 이유로 기피되어 왔던 비선형 시간이력해석(Non-linear Time History Analysis)도 댐퍼 개발의 노력과 함께 점차로 그 중요성이 부각되며 필요성이 권장되는 고무적인 현상이 지속되고 있다. 그러나 아직까지 국내 내진설계 및 해석에서는 비선형 시간이력해석은 댐퍼가 적용되는 등의 특수한 건축물의 내진설계에만 제한적으로 이용되고 있으며 또한 해석 과정에서 해석 시간상의 문제로 $P-\Delta$ 효과를 무시한 채 진행하는 경우도 관찰되고 있다.

그러나 기존의 Gupta와 Krawinkler(2000)의 연구에서는 명시하지 않았으나 시간이력 해석에서 건물 하부에 변형이 집중되는 현상이 나타남이 발견되었고 Kim(2011)의 연구에서는 제진장치가 적용되지 않은 순수 초고층 골조 건물의 경우 건물의 자중에 의해 발생하는 $P-\Delta$ 효과는 무시할 수 없을 정도가 되어 내진 해석 시 필히 검토해 보아야 할 사항임을 나타냄과 동시에 이 현상은 모드 해석 등의 선형해석에서는 예측이 힘들음을 제시하였다. 이에 본 논문에서는 댐퍼 등의 제진장치가 적용되지 않은 철골조 건물을 대상으로 하여 $P-\Delta$ 효과가 건물의 붕괴에 미치는 영향을 비선형 시간이력 해석을 통하여 검증하는 것을 하나의 목표로 하며 $P-\Delta$ 효과에 의하여 건축물에 과다 변형이 발생하는 현상을 방지하기 위한 대책을 제시한다. 이를 위해 현재 적용되기 시작한 고강도 강재인 SM570TMC를 이용한 일반강-고강도강 복합 사용 설계방식을 대안 설계방식으로 제시, 비선형 시간이력 해석을 통해 그 효용성을 검토한다.

2. $P-\Delta$ 효과에 의한 하부 변형집중현상 검증

2.1 기본 이론 및 목적

구조체 부재의 탄성한계를 초과하는 수평하중이 건축물에 부하될 경우, 보 등 수평부재가 손상되어 수평강성이 저하되는 현상이 나타난다. 거대 지진 등으로 인해 이러한 수평강성 저하가 급속히 진행되어 구조물의 수평 자유도가 무한으로 늘어나게 되면, 특히 초고층 골조와 같이 세장비가 큰 골조가 수평 구속력을 어느 한계치 이상 잃게 되는 경우 구조물 자체가 하나의 길고 세장한 커다란 기둥과 같이 거동할 나타날 가능성이 높아진다.

제진장치가 적용되지 않은 순수 골조 건물의 경우 제진 장치가 적용된 건물에 비하여 수평강성을 부담

하는 보 및 기둥이 거대 지진 하에서 소성 항복할 가능성이 높아지고 이에 의해 구조물의 하부에 Fig. 1과 같은 현상이 나타날 확률이 매우 높게 나타난다. Uetani와 Tagawa(1996)의 연구에서는 이와 같이 건물 하부에 변형이 과다하게 일어나는 현상을 [변형집중현상](deformation concentration)으로 정의하여 이러한 현상이 궁극적으로 건물 붕괴에 이르도록 하는 원인을 제공할 수 있음을 보여주었다.

본 장에서는 이러한 변형집중현상을 검증하기 위하여 세장비가 높은 20층 3스팬의 철골조 건물을 설계하여 거대 지진 하에서 $P-\Delta$ 효과가 골조에 미치는 영향을 조사하여 그 위험성을 검증해 보기로 한다.

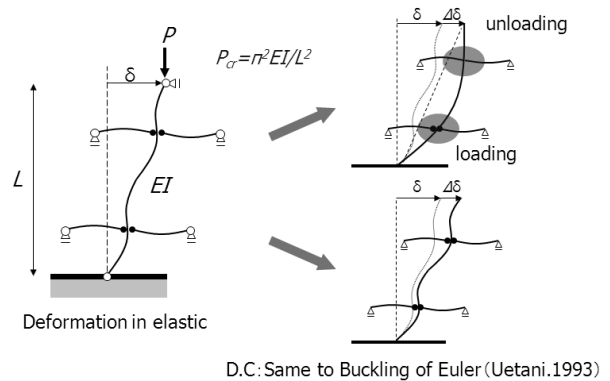


Fig. 1 Mechanism of Deformation Concentration

2.2 해석 개요

1) 해석 조건

$P-\Delta$ 효과에 의한 변형집중현상의 검증은 비선형 시간이력해석 방식을 통하여 시행한다. 본 논문의 비선형 시간이력 해석에 사용하는 프로그램은 미국 CSI사의 PERFORM-3D (V.5.0)로 하며 2차원 골조의 구속조건을 할당한다.

본 논문의 시간이력 해석 시 사용하는 지진파는 일본 공인 설계용 인공지진파 BCJ 시리즈 중 FEMA의 붕괴방지 레벨(=C.P 레벨)과 동일한 응답 가속도를 가지는 BCJ L2파를 선택한다. 또한, 강구조 골조 모델의 수평강성 저하를 야기시키기 위한 거대 지진파는 BCJ L2파를 1.5~2배 증폭시킨 지진파로 설정한다.

2) 모델 개요

본 장에서 사용하는 모델(이하, 기본모델)은 20층 철골조를 대상으로 하며 최대 세장비를 위해 3-span 단순 모델로 설정한다. 모델 형상은 Fig. 2에, 부재 단면 사이즈는 Table 1에 표시한다. 기타 기본모델의 재원은 다음과 같다.

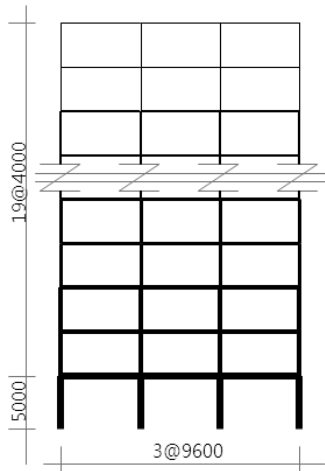


Fig. 2 Basic Model for analysis

Table 1. Sections of Basic Model

Story	Column		Beam
	Outside	Inside	
19F~	□-500x22	□-500x22	H-550x250x12x28
16~18F	□-500x28	□-500x28	H-550x250x12x28
13~15F	□-550x22	□-550x22	H-600x300x16x22
10~12F	□-550x28	□-550x28	H-650x300x16x28
7~9F	□-550x28	□-550x32	H-700x300x14x25
1~6F	□-550x32	□-550x36	H-750x300x14x25

- (1) 부재재료 : SM490
- (2) 보 : Built-up H형강
소성화 후 경화계수 $\alpha=0.02$
콘크리트 바닥 가정 : 강성 2배 증폭
- (3) 기둥 : Built-up 각형 강관
완전소성 가정 ($\alpha=0.00$)
- (4) 소성화 모델 : Bi-linear (전 부재)
- (5) 바닥하중 : 50.21kN/m

또한, 지진하중이 재하 될 경우 구조물이 [보 항복형 붕괴기구]로 파괴되는 것을 유도하기 위해 보 및 기둥 사이즈는 기둥-보 소성비를 계산하여 결정한다. 본 모델의 기둥-보 소성비는 집합 절점을 기준으로 다음 식 (1)에 의한다.

$$\frac{\sum M_{pc}}{\sum M_{pb}} \geq 1.5 \quad (1)$$

3) 해석 개요

20층 2차원 강구조 단순 라멘 모델에 대한 $P-\Delta$ 효과의 영향을 검토하기 위해서 본 장에서는 다음 2종류의 구조해석을 실시한다.

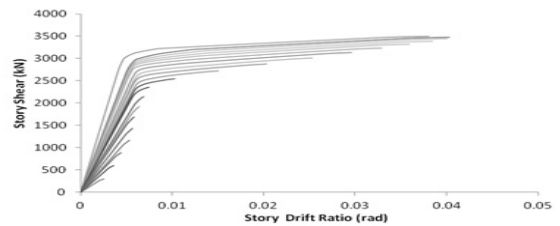
- (1) 비선형 정적증분해석 (Push-over 해석)
- (2) 비선형 시간이력해석

각 해석은 ① $P-\Delta$ 효과 무시 ② $P-\Delta$ 효과 고려 두 가지 조건으로 실시하며 (2) 비선형 시간이력해석의 경우 1)에서 언급한대로 지진하중으로 BCJ L2 지진파의 1.5 및 2배 증폭파를 적용한다.

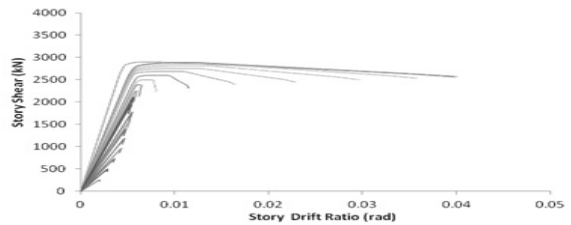
2.3 해석 결과

1) 비선형 정적증분해석

기본 모델에 대한 비선형 정적증분해석에 대한 결과를 Fig. 3에 표시한다. Fig. 3에 의하면 층간변형각 약 0.005~0.008rad에서 층 소성화가 시작되는 것이 관찰된다. $P-\Delta$ 효과의 영향에 관하여서는 $P-\Delta$ 효과를 무시하여 해석할 경우, 층 전단력은 모델 가정과 동일하게 소성화 후에도 탄성 강성의 약 0.02배의 강성을 유지하는 것이 관찰되나, $P-\Delta$ 효과를 고려하여 해석할 경우 자중 및 바닥하중에 의한 중력의 영향으로 회전 하중이 부가되어 소성화 후 층 전단력 강성이 부(-)의 수치로 저하되는 것이 관찰된다.



(a) ignore $P-\Delta$ effect



(b) consider $P-\Delta$ effect

Fig. 3 Result of Push-over Analysis

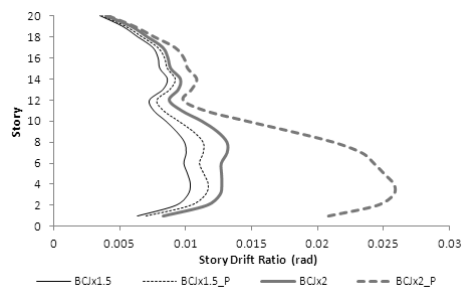


Fig. 4 Result of Non-linear time history Analysis

Table 2. Remarks of Fig. 4

	$P-\Delta$ 효과 무시	$P-\Delta$ 효과 고려
지진과 1.5배 증폭	BCJx1.5	BCJx2
지진과 2.0배 증폭	BCJx1.5_P	BCJx2_P

2) 비선형 시간이력해석

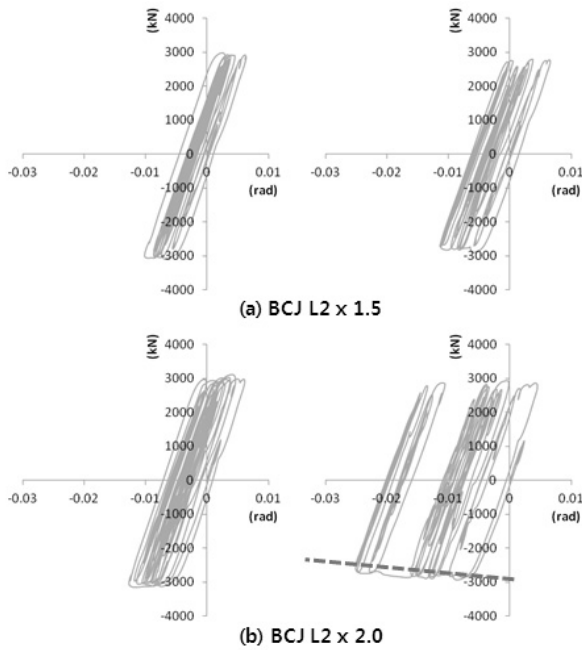


Fig. 5 Dynamic Hysteresis Properties of 5th-story (Shear force vs Story drift)

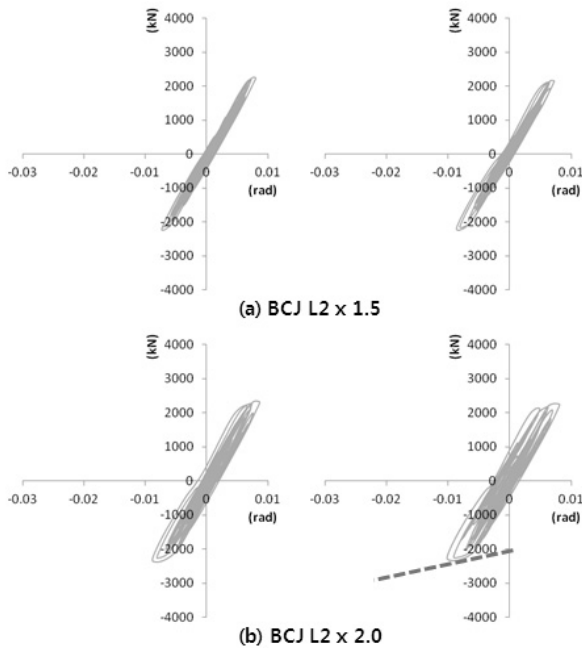


Fig. 6 Dynamic Hysteresis Properties of 15th-story (Shear force vs Story drift)

2.2 해석개요의 1) 및 3)의 조건을 참조하여 비선형 시간이력해석을 시행한 결과를 다음 Fig. 4에 표시한다. Fig. 4에 표기된 범례는 Table. 2에 명시한다.

Fig. 4은 BCJ L2 지진과의 증폭과를 이용한 비선형 시간이력해석 중 모델이 거동하는 층간변형각 이력의 최대치를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에 의하면 1.5배 증폭시킨 BCJ L2 지진과 하에서부터 모델 하부에 $P-\Delta$ 효과에 의한 영향이 나타나기 시작하는 것이 관찰되나, $P-\Delta$ 효과에 의한 변형집중현상은 2배 증폭된 BCJ L2 지진과에서부터 나타남이 관찰된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 비선형 시간이력해석 결과 중 각각 하부층과 상부층을 대표하는 5층과 15층의 층 복원력 이력을 나타낸 그래프이다. 그림 중 좌측 그래프는 $P-\Delta$ 효과를 고려하지 않은 조건에서의 해석 결과이고 우측 그래프는 $P-\Delta$ 효과를 고려한 조건에서의 해석 결과이다. $P-\Delta$ 효과에 의한 영향으로 변형집중현상이 가장 명확하게 나타난 2배로 증폭시킨 BCJ L2과에서의 결과와 층 소성화가 진행되었지만 변형집중현상까지 발전하지 못한 1.5배로 증폭시킨 BCJ L2과에서의 결과를 비교하여 보면, BCJ L2의 1.5배 증폭과에서와 달리 BCJ L2의 2배 증폭과 아래에서는 5층에서 소성화가 진행된 후, 2차 강성(=소성화 후 강성)이 층간변형각의 증가에 따라 점차 부(-)의 슬로프로 저감하고 있는 것이 관찰된다. (우하 그래프 굵은 점선 표시) 또한 복원력 그래프의 중심축도 층간변형각의 증가와 더불어 원점에서 0.01rad 이상 밀려나는 것이 나타난다.

또한, 같은 해석조건에서 상부 15층의 복원력 그래프(Fig. 6의 우하 그래프)를 살펴보면 $P-\Delta$ 효과를 적용하였음에도 불구하고 BCJ L2를 2배까지 증폭시킨 지진과에서도 2차 강성이 저하되지 않은 것이 관찰된다. 이는 앞서 Fig. 1에서 나타낸, 건물 전체의 수평강성이 0에 가깝게 저하되어 건물 전체가 세장한 기둥과 같이 좌굴 거동을 할 때 에너지 소산법칙에 따라 상부 부재 일부는 다시 탄성 영역으로 돌아간다는 [변형집중현상이론]에 부합하는 양상으로 판단되며 상부층의 일부 골조 부재가 소성영역에서 다시 탄성영역으로 복원되었기 때문으로 판단된다.

3. $P-\Delta$ 효과에 의한 하부 변형집중현상 방지

이전 장에서의 비선형 정적증분해석 및 비선형 시간이력해석을 통하여 $P-\Delta$ 효과에 의한 하부층 변형집중현상이 일어나는 현상 및 이론에 대하여 실질적으로 검토해 보았다. 이 장에서는 이전 장에서의 해석 결과를 바탕으로 $P-\Delta$ 효과에 의한 하부층 변형집중현상을 방지하기 위한 방안을 제시한다.

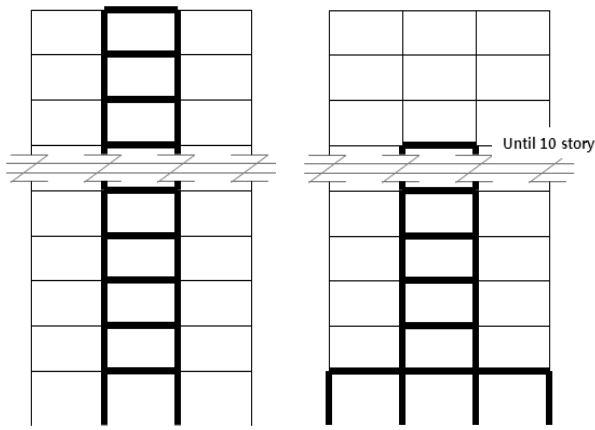
3.1 하부층 변형집중현상의 억제

$P-\Delta$ 효과에 의한 변형 집중현상이 일어나는 가장 큰 요인은 수평강성의 저하로 인한 수평자유도의 증가이다. 전 장의 Fig. 3 및 Fig. 5에 의하면 수평부재가 소성화 상태에 진입하더라도 소성화 후 층강성 증가율 α 가 부(-)의 값까지 저하되지 않는다면 변형집중현상이 발생하지 않음을 검정하였다. 이에 본 장에서는 $P-\Delta$ 효과에 의한 하부층 변형집중현상을 방지하기 위해, 일반강재보다 항복 용력이 1.3~1.4 배 높은 고강도 강재를 이용하여 일반강재의 항복 후에도 고강도 부재가 탄성을 유지, $P-\Delta$ 효과에 의해 층강성이 저하되는 것을 방지하는 고강도강-일반강 혼용 설계를 제안한다.

3.2 대안 설계

1) 대안설계 개요

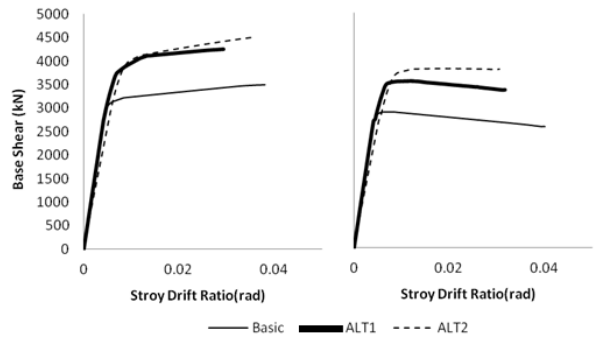
일반강 SM490으로 지정된 구조부재의 소성화가 진행된 후에도 각 층의 수평강성 증감을 소성계수 α 를 일정수치 이상 높이기 위하여 일반강의 항복을 야기하는 하중 아래서도 탄성을 유지하는 고강도 강재 혼용 대안 설계안을 Fig. 7과 같이 제안한다. Fig. 7에서 굵은 선으로 표시한 부분은 구성 부재에 고강도강재를 적용한 부위이다. 대안설계에 적용하는 고강도 강재는 현재 개발완료 상태인 SM570TMC강으로 가정하였다.



(a) ALT-1 (b) ALT-2
Fig. 7 Alternative Models

대안설계에서의 고강도강 배치는 건물 전체의 복원력 특성을 나타낸 Fig. 8에서 나타나는 것과 같이 비선형 정적증분해석을 통해 건물 전체의 소성화 후 강성 증가율 α 가 $P-\Delta$ 효과를 고려한 경우에도 층간변형각 약 0.001rad까지 부(-)의 값으로 떨어지지 않도록 하는 것을 기준으로 한다. 각 대안설계의 특징은 다음과 같다.

- (1) ALT-1 : 정중앙 스패를 Core로 가정하여 Core 부분에 고강도강 SM570TMC 적용
- (2) ALT-2 : 기본모델에서 소성화 후 강성저하가 확연히 나타나는 10층 이하에 Core 부분을 중심으로 고강도강 SM570TMC 적용



(a) ignore (b) consider $P-\Delta$ effect
Fig. 8 Result of Push-over Analysis

2) 대안설계 모델 개요

대안설계 모델(이하 대안모델)의 각 부재 단면은 기본모델의 [보 항복형 파괴기구]를 유지하기 위하여 기본모델과 동일하게 설정한다. 부재의 소성화 모델은 일반강재 SM490과 동일한 Bi-linear로 가정한다.

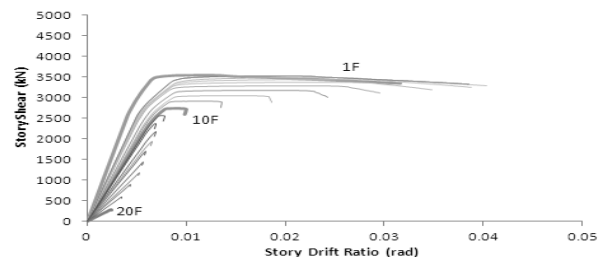
3) 해석개요

$P-\Delta$ 효과가 구조물에 끼치는 영향을 검정하기 위하여 대안모델 역시 전 장의 기본모델에 행한 동일한 해석을 시행한다.

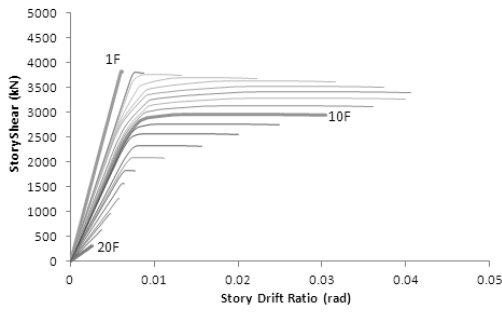
3.3 해석 결과

1) 비선형 정적증분해석

대안모델의 $P-\Delta$ 효과를 고려한 각 층 비선형 정적증분해석 결과를 Fig. 9에 표시한다. Fig. 9을 전 장의 기본모델에 대한 비선형 정적증분해석 결과인 Fig.3(b)와 비교하여 볼 때 전체적으로 최대 층전단력도 늘어나지만, 소성화 후 $P-\Delta$ 효과에 의해 수평강성이 급격히 저하되는 층 수가 줄어드는 것이 보이며 층 강성이 부(-)의 값으로 변하기 시작하는 층간변형각도 증가하는 것이 관찰된다.



(a) ALT-1



(b) ALT-2

Fig. 9 Result of Push-over Analysis

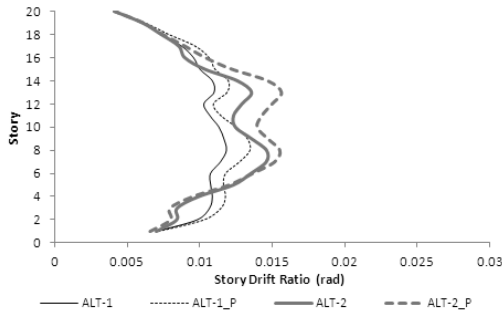


Fig. 10 Result of Non-linear time history Analysis (BCJ L2 x 2)

2) 비선형 시간이력해석

$P-\Delta$ 효과에 의한 구조물 하부층의 변형집중현상을 억제하기 위한 대안모델의 유효성을 검토하기 위하여 비선형 시간이력해석을 수행한 결과를 Fig. 10에 제시한다. Fig. 10에서는 전 장의 해석결과를 참조하여 $P-\Delta$ 효과에 의한 구조물 하부층의 변형집중현상이 탁월하게 나타난 BCJ L2의 2배 증폭과를 적용한 해석결과 중 층간변형각 이력의 최대값을 나타낸 그래프를 제시한다. Fig. 10에 의하면 $P-\Delta$ 효과의 고려 유무에 따라 결과에 약간의 차가 발생하지만 동일 지진하중에서 기본모델에 나타난 하부층 변형집중현상은 억제된 것을 알 수 있다.

Fig. 11~12은 BCJ L2의 2배 증폭과를 적용하였을 때 각 대안모델이 나타내는 복원력 특성을 제시한 그래프이다. Fig. 11~12에서는 전 장과 마찬가지로 하부층과 상부층을 대표하는 5층과 15층의 층 복원력을 표시한다. 또한 Fig. 5~6과 마찬가지로 좌측은 $P-\Delta$ 효과를 무시한 해석 결과를, 우측은 $P-\Delta$ 효과를 고려한 해석결과를 제시한다.

Fig. 11~12에 의하면, 대안모델에서는 $P-\Delta$ 효과를 고려한 해석에서도 소성화 후 층강성의 저하나 복원력 중심축의 이동 등이 관찰되지 않음을 알 수 있다. 또한 기본모델에서 $P-\Delta$ 효과 고려 시 하부층 변형집중현상이 발견되었던 5층의 층강성 이력을 살펴보면 $P-\Delta$

효과를 고려한 해석 하에서도 기본모델의 경우와는 달리 소성화 후 층강성이 모델의 부재가정과 동일하게 탄성강성의 약 0.02배를 유지하는 것이 관찰된다.

4. 결론

본 논문에서는 거대 지진 등의 수평하중으로 인해 수평강성이 손상된 골조에 $P-\Delta$ 효과가 미치는 영향을 검정함과 동시에 $P-\Delta$ 효과에 의해 고층 골조에

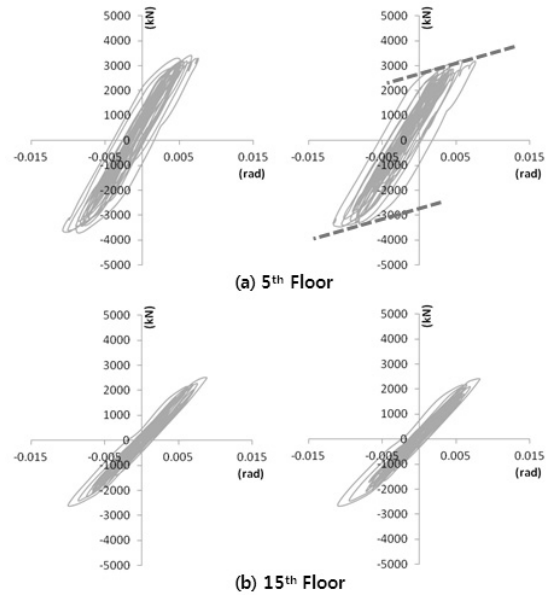


Fig. 11 Dynamic Hysteresis Properties of ALT-1 (Shear force vs Story drift)

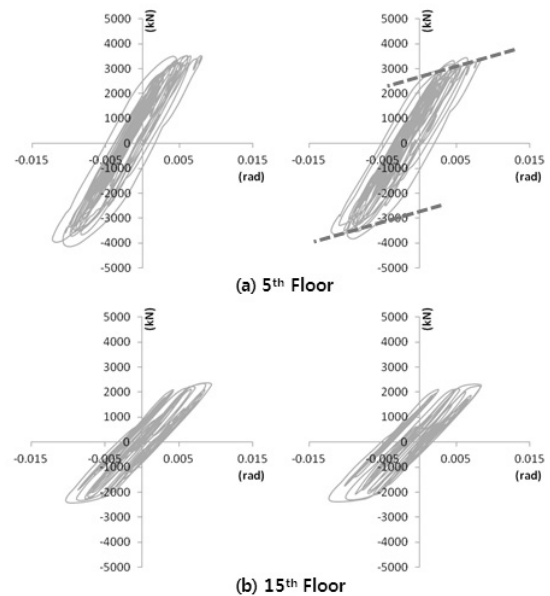


Fig. 12 Dynamic Hysteresis Properties of ALT-2 (Shear force vs Story drift)

야기되는 하부층 변형집중현상을 방지하기 위한 대안 설계 기법을 제시하였다.

본 대안 설계의 주요 특징은 일반강과 함께 일반강보다 항복강도가 약 1.3~1.5배 높은 600MPa급의 고강도강을 복합 사용하여 구조체의 부재가 소성화 상태로 진입한 이후 $P-\Delta$ 효과에 의해 야기되는 층 강성의 저하를 효과적으로 지연시키는 데에 있다. 또한 이 대안설계에서 사용되는 고강도 강재와 일반 강재의 탄성계수는 동일하므로 어느 부위를 고강도 강으로 교체하여도 모델의 탄성 고유주기가 변하지 않는다는 장점이 있다.

본 논문의 결론을 다음과 같이 요약한다.

- 1) 거대 수평하중 등에 의하여 수평강성이 손상된 건축물에 $P-\Delta$ 효과가 야기하는 하층부 변형집중현상은 소성화 후 약화된 2차 강성(=소성화 후 강성)을 보강하는 것으로 억제 할 수 있다.
- 2) 2차 강성(=소성화 후 강성) 보강을 위하여 600MPa급의 고강도강을 복합 사용하여 대안설계를 실시한 결과 $P-\Delta$ 효과로 인한 하부층 변형집중현상이 효과적으로 억제된 것이 관찰되었다.
- 3) 하부층 변형집중현상을 방지하기 위해 고강도강을 복합 사용한 대안설계를 실시할 경우, 전층에 적용하지 않고 $P-\Delta$ 효과의 영향이 나타나는 층에만 선택 적용하여도 하부층 변형집중현상이 억제되는 것이 관찰되었다.

References

- Computer and Structures, Inc. (2006). "Perform-3D Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures version 4." *CSI*, University of California at Berkeley, CA, USA.
- Gupta, A. and Krawinkler, H. (2000). "Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels." *J. Struc. Eng., ASCE*, 126(1). pp.98-107.
- Gupta, A. and Krawinkler, H. (2000). "Dynamic P-delta effect for flexible inelastic steel structures." *J. Struc. Eng., ASCE*, 126(1). 2000. pp.145-154.
- Kim, M. (2011). "Examination of seismic design for high-rise steel frames under huge earthquake using element bi-linear time-history analysis." *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, 2(4), pp.28-34.
- Uetani, K. and Tagawa, H. (1996). "Deformation concentration phenomena in the process of dynamic collapse of weak-beam-type frame." *J. Struc. Construc. Eng.*, 483, pp.51-60.
- Uetani, K. and Tagawa, H. (1996). "Seismic Response of

Steel Frames Including Brittle Fractures at Beam-Ends." *J. Struc. Construc. Eng.*, 489, pp.77-84.

- Tagawa, H., Uetani, K., Tachibana, A., and Yoshidam, N. (1998). "Experimental Study on Collapse Behavior of Weak-beam Planner Frame Subjected to Repeated Horizontal Loading." *J. Struc. Construc. Eng.*, 513, 1998. pp.89-96.