

보 붕괴형 메커니즘을 가지는 강구조 다층골조의 손상분포

Damage Distribution Rule of Weak Beam Type Multi-Story Steel Frames Influenced by Strength and Stiffness Ratios of Beam and Column

오 상 훈*
Oh, Sang-Hoon

유 흥 식**
Ryu, Hong-Sik

문 태 섭***
Moon, Tae-Sup

국문요약

부재의 내력비, 강성비에 영향을 받는 다층 강구조 골조의 내진성능을 평가하기 위하여 내력비 및 강성비를 설계 파라미터로 하여 동적 비탄성 응답해석을 수행하였다. 해석 결과에 대한 분석을 통하여 내력비와 강성비의 변화폭이 큰 다층골조의 손상분포 예측식을 제안하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 보기둥 내력비 및 강성비가 작아질수록 1층의 기둥 주각부에서의 손상집중 현상이 크게 나타났다. 2) 보기둥 내력비 및 강성비를 고려하여 보붕괴형 강구조 다층골조의 손상분포를 예측할 수 있는 식을 제안하였으며, 예측식은 응답해석 결과와 좋은 대응을 보였다. 3) 본 연구에서 제안한 손상분포 예측식은 강접 및 반강접 보붕괴형 강구조 다층골조의 손상분포를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 응답해석, 손상분포, 붕괴형, 내력비, 강성비

ABSTRACT

In order to evaluate the limit earthquake resistance of multi-story steel frames influenced by the strength and stiffness ratios of members, a series inelastic response analysis were carried out. From the analysis results, the damage distribution rules of multi-story steel frames were proposed. Conclusions are summarized as follows: 1) As the stiffness ratios of beam and column becomes small, the damage concentrates on the lower end of columns of the first story. 2) Considering the strength and stiffness ratios of the beam and column with weak beam type mechanism, the equations predicting the damage distribution of multi-story steel frames were proposed. 3) Through the equation which was supposed in this study, it is speculated that the damage distribution of the rigid or semirigid beam collapse type multi-story steel structure building can be predicted.

Key words : response analysis, damage distribution, collapse mechanism, strength ratio, stiffness ratio

1. 서 론

다층골조의 설계에서는 구조물 각 부의 손상분포를 예측하는 것은 가장 중요하다. 기둥항복형의 골조에서는 제1층 및 내력변화층에서 손상집중이 발생하기 쉬운 반면, 보붕괴형 골조에서는 기둥붕괴형에 비해 특정층에서의 손상집중 현상을 완화하여 전체 붕괴 메커니즘을 형성하기 쉬우므로 내진성능을 발휘하는 데 유리하다.⁽¹⁾ 그러나, 지금까지 보붕괴형 골조를 대상으로 한 대부분의 해석적 연구에서는 기둥-보 접합부를 강접으로 하여 보 부재의 강성이 어느 정도 확보된 모델을 대상으로 하였으며^{(2),(3)}, Akiyama는 강접모멘트 프레임의 손상분포를 각 층의 내력분포를 이용하여 높이방향의 손상분포를 예측하였다.⁽²⁾

그러나 Akiyama가 제시한 식은 강접 모멘트 프레임을 대상으로 하였기 때문에 각 층의 내력분포만을 이용하여 각 층의 손상분포를 예측하였으며, 접합부가 핀접합 혹은 반강접 접합된 경우에 손상분포가 달라지는 현상을

설명하지 못하였다. 그러나, 반강접 골조에 대한 응답해석 결과에서는 각 층이 같은 내력분포를 가지더라도 접합부 강성이 작은 경우에는 Akiyama가 예측한 손상분포식보다 제 1층 혹은 내력변화층에 손상집중이 매우 크게 나타났다.⁽³⁾

본 연구에서는 보붕괴형 메커니즘을 가지는 다층골조에서 강접접합 뿐만 아니라 반강접 접합부를 가지는 경우에도 설계에 용이하게 활용하기 위하여 보기둥 내력비, 보기둥 강성비를 파라미터로 한 탄소성 응답해석 결과를 이용하여 각 파라미터가 보붕괴형 다층골조의 응답특성에 미치는 영향을 정성적으로 평가하고, 각 층에 발생하는 손상분포를 예측하기 위한 예측식을 제안하고자 한다.

2. 해석 및 해석방법

2.1 해석모델의 개요

본 연구에서는 해석모델로서 그림 1에 나타난 무한균등 모멘트 골조를 이용하였다. 층고는 전층을 4m로 하였으며, 1스팬당 층중량은 490KN으로 하여, 각 절점에 집중하중으로 작용하는 것으로 하였다. 해석모델의 층수는 6층, 9층, 15층, 24층으로 하였다. 부재단면은 3층마다 동일단면으로 설계하였다.

* 정희원·포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원, 공학박사
(대표저자: oshoon@rist.re.kr)

** 정희원·포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원, 박사수료

*** 한양대학교 건축공학부 정교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 6. 30 / 심사종료일 : 2005. 10. 10)

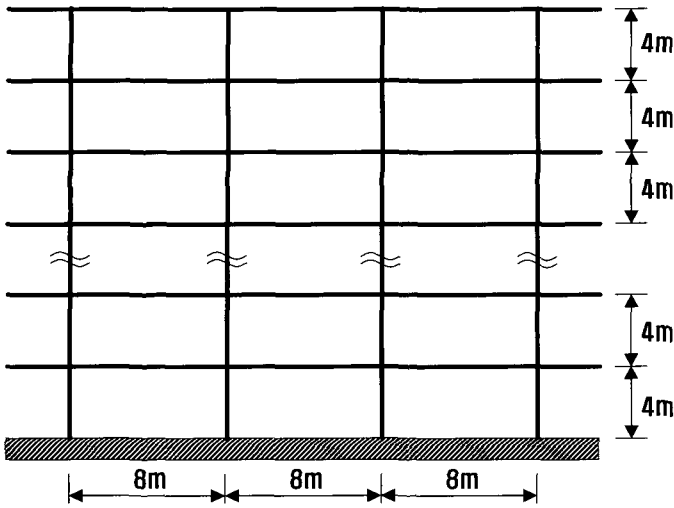


그림 1. 해석모델(무한 균등 다층 골조)

보기둥 강성비 : 0.1, 0.3, 0.5, 0.8

2.3 해석모델의 설계방법

해석모델의 설계에서는 우선 기둥단면을 산정하고, 전 층에 따른 기둥의 내력 및 강성을 결정하였다. 기둥의 단면을 산정하기 위해서는 먼저 제1층에 작용하는 밀면전단력을 산정하여야 하나, 밀면전단력 계수 α_{e1} 는 설계용 에너지 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.⁽⁵⁾

$$\alpha_{e1} = \frac{2\pi V_{ED}}{Tg} \quad (1)$$

여기서, V_{ED} : 설계용 에너지 입력의 속도환산치

T : 설계용 1차 고유주기

g : 중력가속도

설계에서 사용한 설계용 에너지 입력속도의 속도환산치는 국내의 설계용 에너지 스펙트럼의 제1종 지반을 이용하여 다음의 값을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$V_{ED} = 60 \text{ (cm/sec)} \quad (2)$$

그리고 설계용 1차 고유주기는

$$T = 0.03h \quad (3)$$

h : 해석모델의 높이

로 가정하여 각 모델의 밀면전단력 계수 α_{e1} 을 결정하였다.

그리고 밀면전단력은 밀면전단력계수에 건물의 중량을 곱하여 구하였다.

기둥의 단면은 이 밀면전단력에 저항할 수 있도록 결정하였고, 보부재는 보기둥 내력비(gM_p/cM_p), 보기둥 강성비(K_g/K_c)에 대한 내력 및 강성을 가지는 선재로 가정하였다.

2.4 부재의 복원력 특성

기둥, 보 모두 완전탄소성형의 복원력 특성을 가지는 것으로 하였다.

2.5 해석방법

해석에 사용한 입력 지진파는 그림 3과 같이 El-Centro NS파(계속시간 54초), Hachinohe EW파(계속시간 30초), Kobe NS파(계속시간 30초) 및 bi-linear형의 에너지 스펙트럼을 가지는 인공지진파⁽⁷⁾를 이용하였다. 수치적분법은 평균가속도법을 이용하였으며, 감쇠의 영향을 배제하기 위하여 감쇠는 없는 것으로 하였다. 해석 파라미터로는 입력지진파에 가속도배율을 곱하여 입력에너지의 레벨을 변화시켜, 기둥 혹은 보 부재중에 어느 하나의 부재 단부에 발생한 힌지의 회전각이 항복회전각의 6배에 도달

2.2 모델설계의 개요

해석모델의 설계에서는 기둥에 대한 보의 내력비와 강성비를 파라미터로 하였다. 각 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{보기둥 내력비} = gM_p/cM_p$$

$$\text{보기둥 강성비} = K_g/K_c$$

여기서 gM_p : 보의 전소성 모멘트

cM_p : 축력을 무시한 기둥의 전소성 모멘트

K_g : 반곡점을 보부재 중앙으로 한 경우의 보 힌지의 회전강성

단, 보힌지의 회전강성은 접합부 플랜지의 회전강성과 보부재의 회전강성의 직렬 회전강성으로 정의한다.(그림 2)

$$K_g = \frac{K_B \cdot K_{JF}}{K_B + K_{JF}}$$

여기서, K_B : 보부재의 회전강성

K_{JF} : 접합부 플랜지면의 회전강성

K_c : 반곡점을 기둥부재 중앙으로 한 경우의 기둥의 휨강성

보기둥 내력비 및 강성비의 값은 다음과 같이 결정하였다.

보기둥 내력비 : 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8

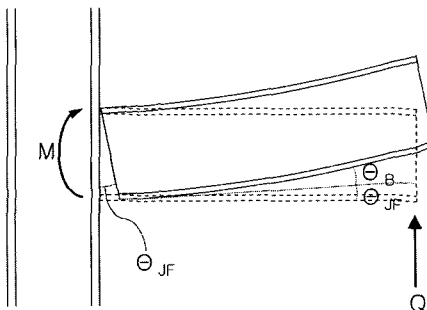


그림 2. 보 강성의 정의

$$K_B = M/\theta_B$$

$$K_{JF} = M/\theta_{JF}$$

$$K_g = \frac{K_B \cdot K_{JF}}{K_B + K_{JF}}$$

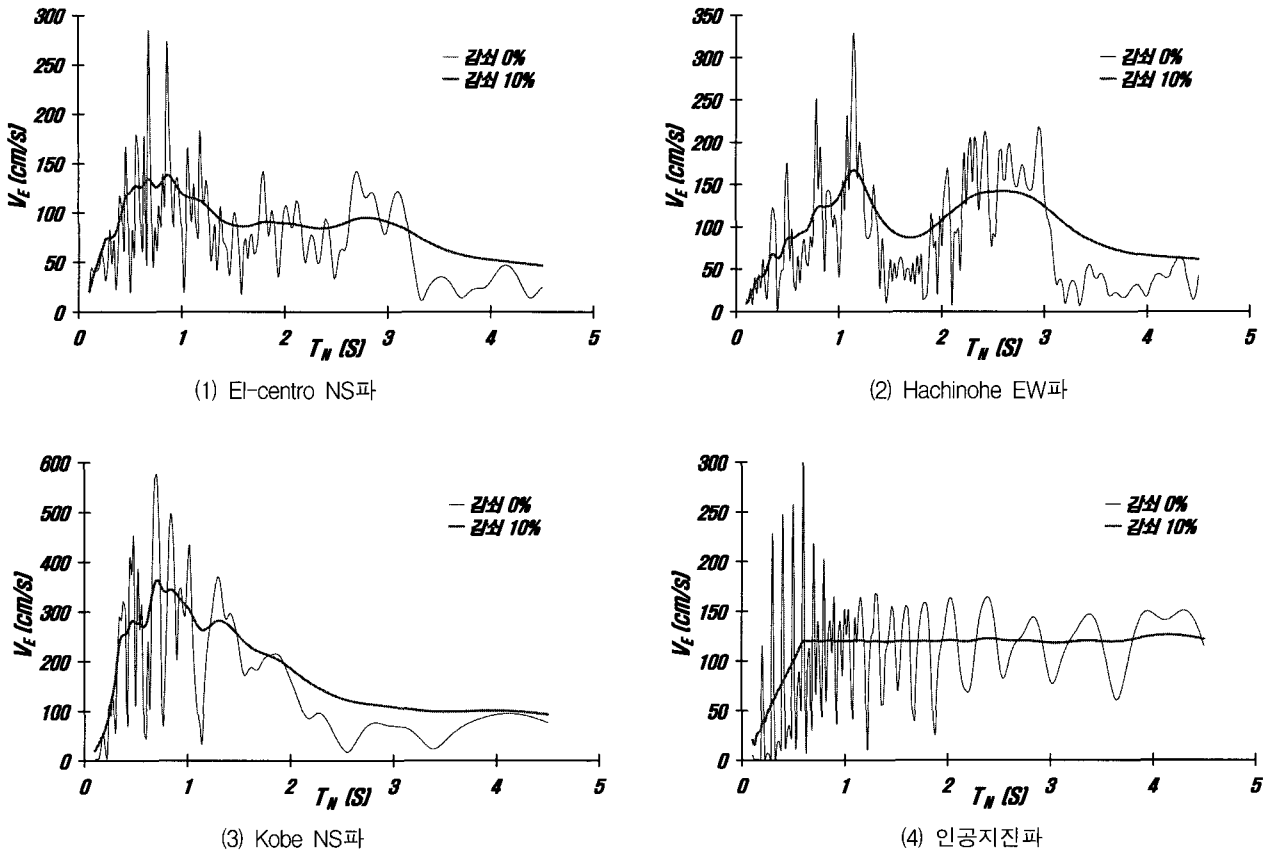


그림 3. 입력 지진파에 의한 에너지 등가속도 스펙트럼

한 경우를 한계상태로 판정하였다.

3. 해석결과

3.1 부재별 손상분포

3.1.1 보기둥 내력비의 변화에 의한 손상분포

보기둥 강성비(K_g/K_c)를 0.3으로 한 9층 해석모델에 대해 보기둥 내력비를 파라미터로 하여 El-Centro NS파를 입력한 경우의 한계상태에서의 각 부재별 손상분포를 그림 4에 나타내었다. 횡축은 골조전체에서 흡수한 소성변형에너지에 대한 각 부재에서 흡수한 소성변형에너지의 비율을 나타내고 있다.

보기둥 내력비가 작은 골조에서는 기둥에서의 손상은 크지 않고 보부재에서 대부분의 에너지를 흡수하고 있으며, 손상은 각 층으로 균등하게 분산되고 있다. 그러나 보기둥 내력비를 크게 하면 보의 내력이 기둥에 비해 상대적으로 크게 되었기 때문에 기둥에 손상이 집중하고 있다.

이상의 경향은 해석모델의 층수, 입력파와 상관없이 거의 같은 양상을 나타내었다.

3.1.2 보기둥 강성비의 변화에 의한 손상분포

보기둥 내력비(${}_gM_p/{}_cM_p$)를 0.6으로 한 9층 모델에 대해 보기둥 강성비를 파라미터로 하여 Hachinohe EW파를 입력한 경우의 한계상태에서의 각 부재별 손상분포를

그림 5에 나타내었다.

보기둥 강성비가 0.1인 골조에서는 지진입력에너지의 전부를 기둥부재가 흡수하고 있고, 제1층에서 기둥 하단부에서의 손상집중이 매우 크게 나타나고 있다. 그러나, 보기둥 강성비가 크게 됨에 따라 보부재의 에너지 흡수량이 크게 되고 있고, 제1층의 기둥하단부에 집중되었던 손상도 각 층으로 분산되는 경향을 나타내고 있다. 단, 보기둥 강성비가 0.8인 골조에서는 중층부에서의 손상이 커지는 경향을 나타내었다. 이상과 같이 같은 보기둥 내력비를 가지는 골조에서도 보기둥 강성비가 작아지면 특정층에서의 손상집중의 원인이 되고 있음을 알 수 있다.

3.2 제1층에서의 손상집중율

각 모델에 대해 지진응답해석을 한 결과, 제2층 이상의 기둥은 거의 탄성에 머물고 있고, 각 층에서의 손상도 균등히 분산되는 경향을 보였다. 그러나 제1층에서는 각 해석 파라미터에 의한 손상집중율의 변화가 크게 나타났기 때문에 우선 제1층에서의 손상집중율에 주목하여 해석결과를 정리하였다.

3.2.1 보기둥 내력비의 변화에 의한 손상집중율

보기둥 강성비(K_g/K_c)을 0.3, 0.8로 하였을 때의 보기둥 내력비(${}_gM_p/{}_cM_p$)에 대응한 한계상태에서의 제1층에서

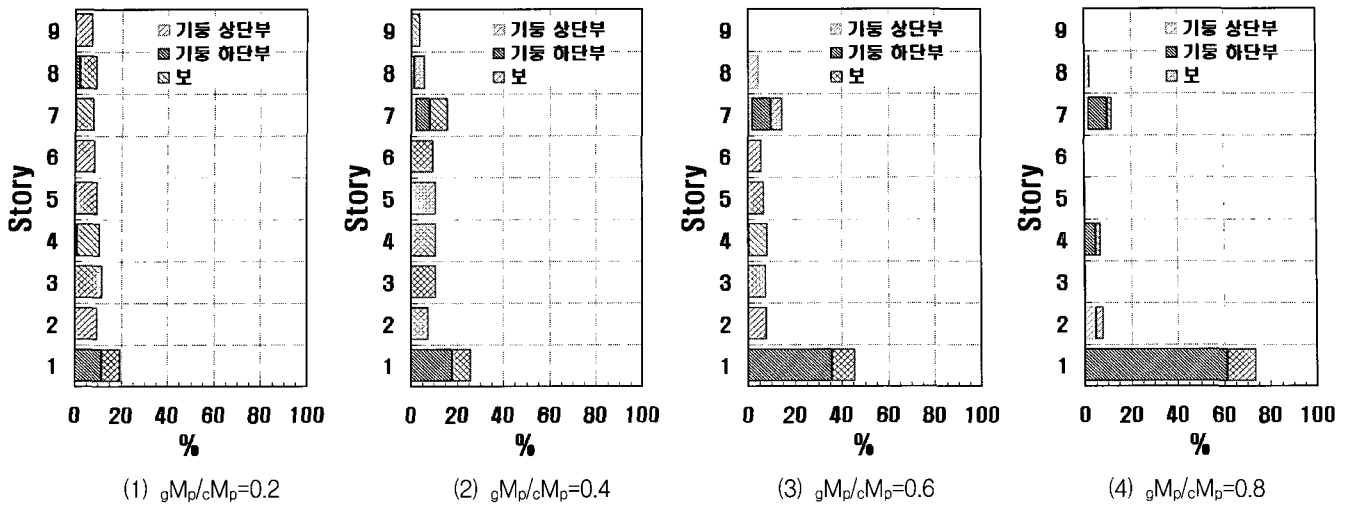


그림 4. 보기동 내력비에 따른 각부재별 손상분포 (El-Centro NS파, $K_g/K_c=0.3$)

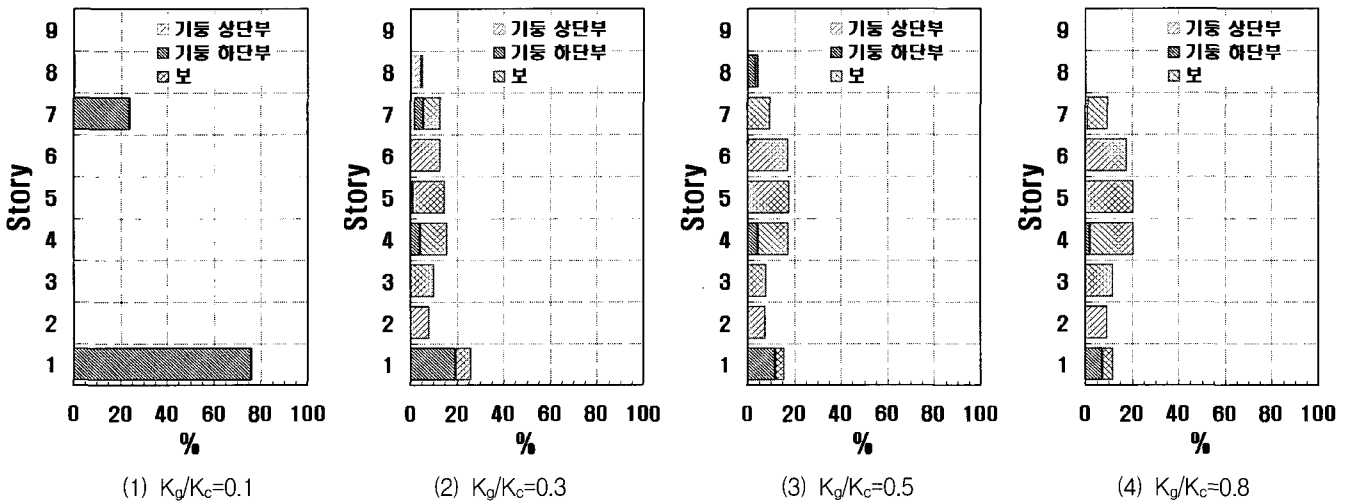


그림 5. 보기동 강성비에 따른 각부재별 손상분포 (Hachinohe EW파, $oM_o/cM_o=0.6$)

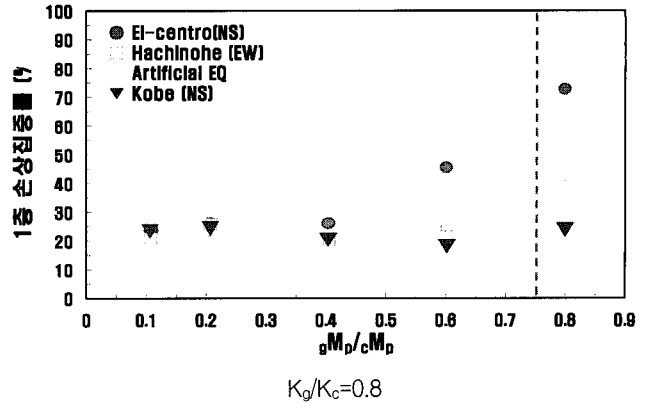
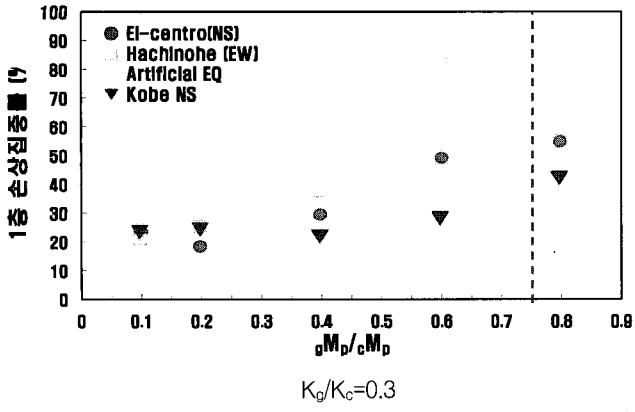
의 손상집중율을 그림 6에 나타내었다. 종축은 골조전체에서 흡수한 소성변형에너지에 대한 제1층에서 흡수한 소성변형에너지의 비율을 나타내고 있으며, 횡축은 보기동 내력비를 나타내고 있다. 해석모델의 층수에 관계없이 보기동 강성비가 0.3일 때는 보기동 내력비가 클수록 제1층에서의 손상집중율이 크게 되고, 입력지진파에 의한 편차도 크게 나타나고 있다. 그러나 보기동 강성비가 0.8이 되면 보기동 내력비의 변화가 제1층의 손상집중율에 미치는 영향이 작게 되어 입력지진파에 의한 편차도 작게 되고 있다. 이것은 보기동 강성비가 작은 경우는 보기동 내력비가 크게 될수록 보의 항복변형의 변화량도 크게 되므로 제1층의 기동 하단부에서의 손상집중율의 변화가 크게 되어 제1층에서의 손상집중율의 변화도 크게 나타나는 반면, 보의 강성이 어느 정도 확보되면 보의 내력이 크게 되어도 항복변형의 변화량은 그다지 크지 않아 보기동 내력비의 변화에 의한 제1층에서의 손상집중율의 변화도 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

또한 보기동 내력비가 0.8인 경우, 기동이 보 부재 보다 먼저 한계상태에 도달하여 기동붕괴형 메커니즘을 형

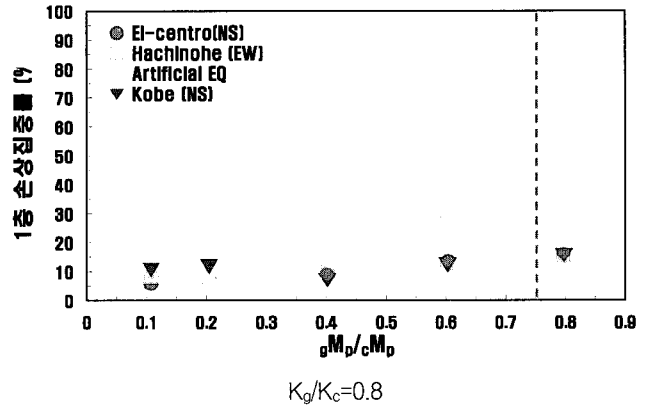
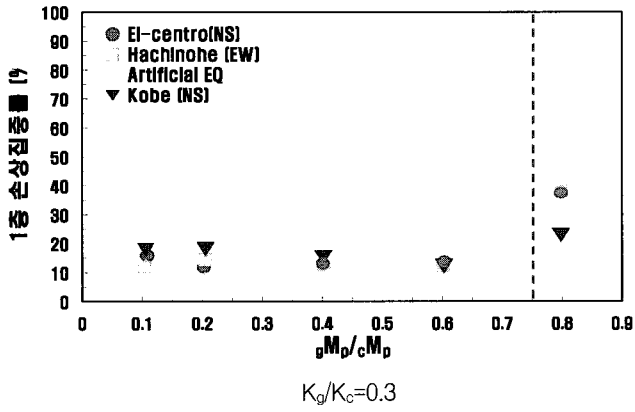
성하였다. 이것은 평면골조가 보붕괴형 골조가 되기 위해서는 기동의 내력이 보의 내력보다 1.3배 이상(굵은 점선) 필요한 것으로 밝혀져 있으나, 보기동 내력비 0.8인 경우는 보의 내력에 대한 기동의 상대내력이 작게 되고, 이 조건을 만족하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2 보기동 강성비의 변화에 의한 손상집중율

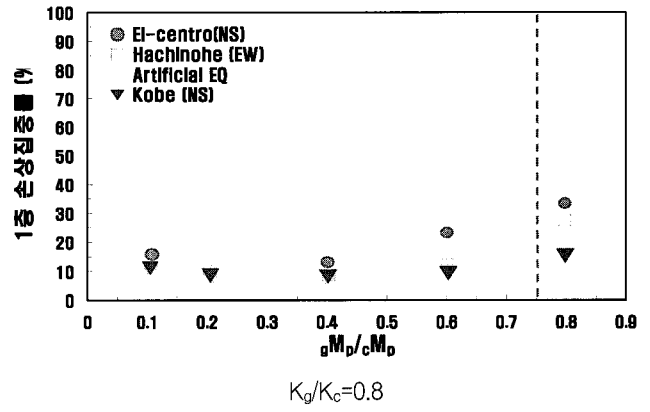
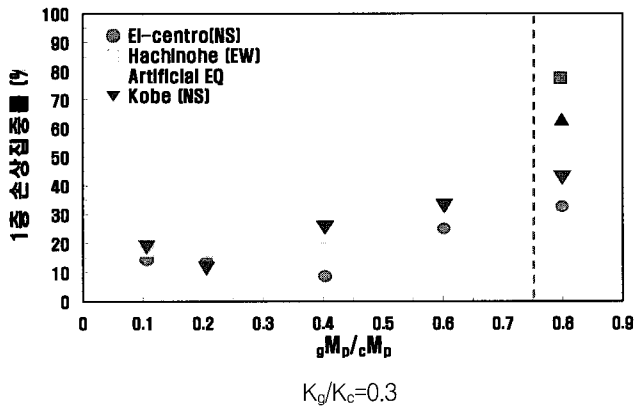
보기동 강성비를 파라미터로 하여 El-Centro NS파를 입력한 경우의 보기동 강성비의 변화에 의한 한계상태에서의 제1층의 손상집중율을 그림 7에 나타내었다. 보기동 내력비가 작게 되어 상대적으로 보의 내력이 작게 된 모델일수록 보기동 강성비의 변화에 의한 영향은 작아지고 있으나, 보기동 내력비가 0.6, 0.8인 모델은 보기동 강성비가 0.3이하의 범위에서 제1층에서의 손상집중이 현저하게 나타났다. 이것은 보기동 내력비가 같아도 보의 강성이 작아지면 보의 항복변형량이 크게 되어 제1층의 기동의 하단부에서 소성화가 상당히 진행되더라도 보는 항복하기 전에 탄성변형량에 여유가 있어 소성화 정도가 크지 않은 까닭이다.



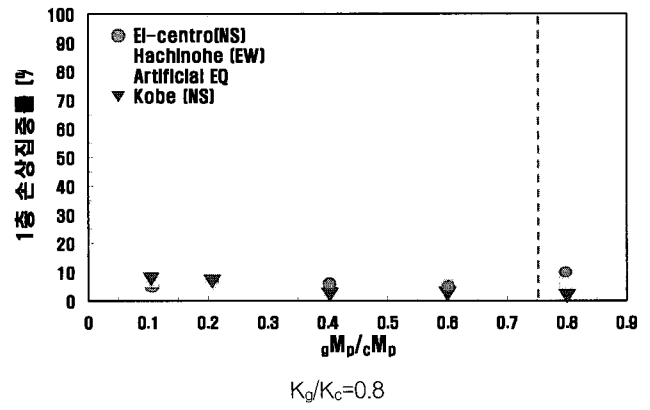
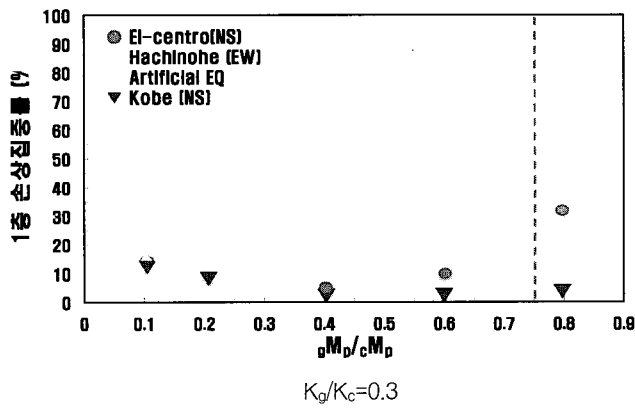
(1) 6층



(2) 9층

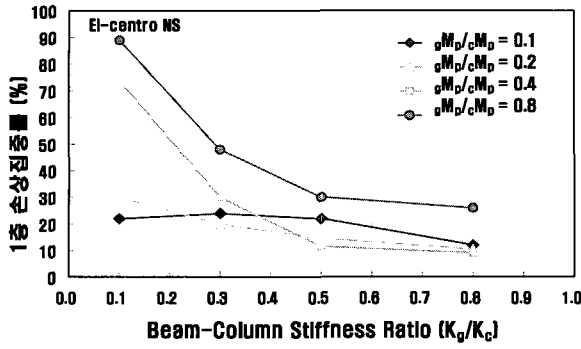


(3) 15층

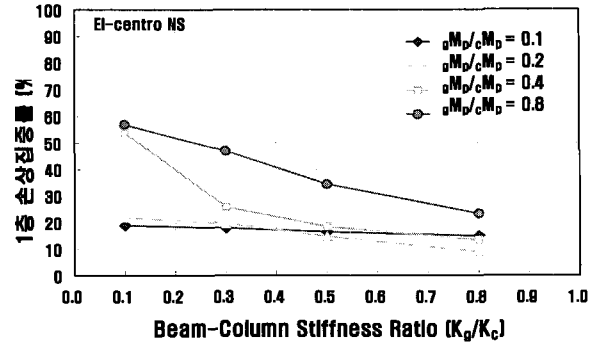


(4) 24층

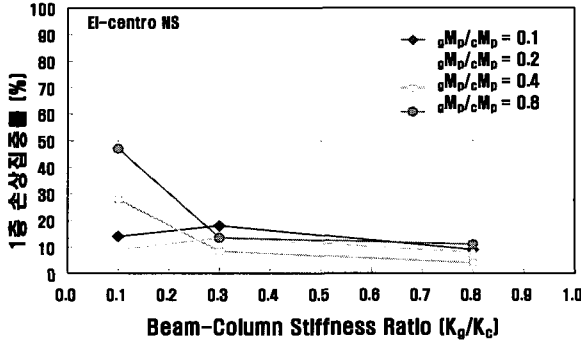
그림 6. 보기동 내력비에 대한 1층에서의 손상집중율



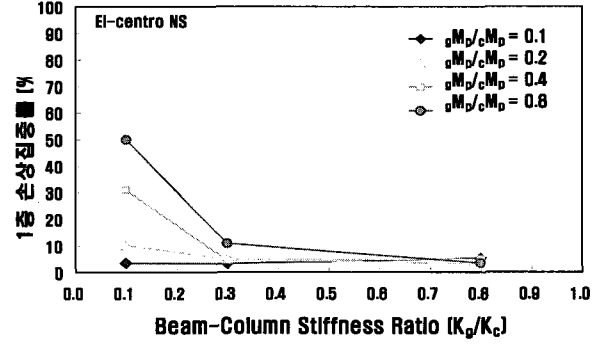
(1) 6층



(2) 9층



(3) 15층



(4) 24층

그림 7. 보기둥 강성비에 대한 1층에서의 손상집중율

4. 손상분포 법칙

보붕괴형 골조에 대한 높이 방향의 누적소성변형에너지(손상)분포 법칙으로 Akiyama는 다음과 같은 식을 제안하고 있다.⁽²⁾

$$\frac{W_{\pi}}{W_p} = \frac{Q_i P_i^{-n}}{\sum_{j=1}^N Q_j P_j^{-n}} \quad (4)$$

여기서, $Q_i = (\sum_{k=j}^N m_k) \alpha_j / M$

α_j : 최적항복전단력계수 분포

α_i : i층에서의 항복전단력계수

M : 구조물의 총질량

여기서 $P_i (= (\alpha_i / \alpha_1) / \alpha_i)$ 는 실제 항복강도 분포와 최적항복 전단력 계수분포의 차이를 나타내고 있으며, P_i 가 작은 층에서는 손상집중이 발생하기 쉽다. 손상집중지수 n 은 실제의 항복최적항복전단력 계수의 격차에 대한 손상집중의 민감도를 나타낸 값으로 n 의 값이 클수록 손상집중이 나타나기 쉽다. 보붕괴형 골조에서는 $n=6$ 의 값을 제시하고 있다.

한편 그림 8과 같이 전체붕괴 메커니즘을 설정하고, 각 층의 내력을 계산하면 보 보다 기둥의 내력이 크기 때문에 제1층의 내력이 크게 되어 각 층의 내력을 파라미터

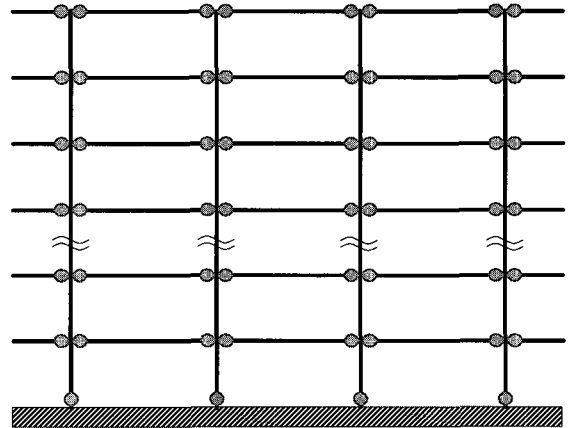


그림 8. 붕괴 메커니즘

로 하여 손상분포를 예측한 (4)식에서는 제1층에는 손상이 거의 발생하지 않게 된다. 그러나 그림 7에 나타난 응답해석 결과와 같이 같은 내력 분포를 가지는 골조일지라도 보기둥 강성비가 작을수록 제1층에 손상이 집중하고 있으므로 (4)식은 보기둥 강성비의 변화에 의한 손상집중 현상을 설명하지 못한다. 한편 제2층 이상의 층에서는 기둥에 거의 손상이 발생하지 않는 것으로 보아 연성효과에 의해 손상은 각 층에 분산되어 매우 안정된 손상분포를 나타내고 있다.

따라서 제1층의 손상집중현상을 평가하기 위해서는 제1층의 p_1 을 적절하게 평가하여야 하며, 제1층의 손상집중을 평가하기 위해서는 p_1 의 값이 작게 되고 n 의 값은 p_i 에 의존하는 경향이 있으므로 2층 이상의 층에서는 n 의

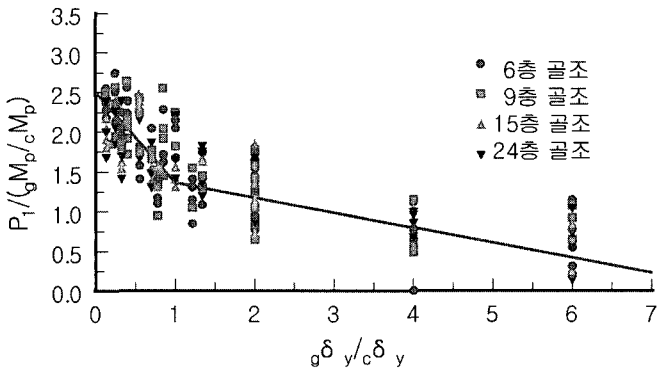


그림 9. P₁값

값을 3으로 낮출 수 있다.⁽²⁾

따라서 n=3을 이용하여 (4)식에서 P₁을 어느 정도로 하는 것이 타당한가를 응답해석 결과를 이용하여 검토하여 그림 9에 나타내었다.

그림에서 gδ_y(=gM_p/K_g)는 보의 항복변형, cδ_y(=cM_p/K_c)는 기둥의 항복변형이다. 그림에서 다소의 편차가 있기는 하나 P₁의 값은 대략 다음의 식으로 근사시킬 수 있다.

① gδ_y/cδ_y ≤ 1인 경우

$$P_1 = \frac{gM_p}{cM_p} (2.5 - 1.1 \frac{gM_p}{cM_p} \cdot \frac{K_c}{K_g})$$

② gδ_y/cδ_y > 1인 경우

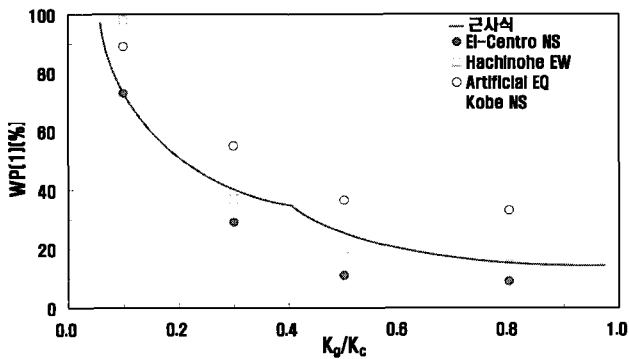
$$P_1 = \frac{gM_p}{cM_p} (1.6 - 0.2 \frac{gM_p}{cM_p} \cdot \frac{K_c}{K_g}) \quad (5)$$

그림 10은 보기둥 내력비가 0.4인 경우에 보기둥 강성비의 변화에 의한 제1층의 손상분포를 나타낸 것이다. 여기서 중축은 (5)식에서 P₁을 구하고, 이 값을 (4)식에 대입해 구한 제1층에서의 손상분포이다. 굵은 선으로 나타낸 예측식은 각 부재별 내력비, 강성비, 골조의 층수 및 입력지진파에 관계없이 응답해석치와 좋은 대응을 보이고 있다.

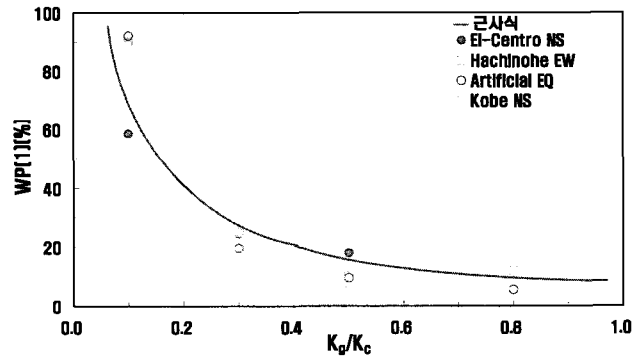
또한 6층 및 24층에 대한 각 층의 손상분포를 그림 11에 나타내었다. 6층 모델의 예측치에서는 상층부(5층, 6층)에서 손상을 과소평가하는 경향이 있다. 24층 모델의 보기둥 강성비가 0.1인 모델에서는 지진파에 상관없이 편차가 크고, Kobe NS파의 경우 상층부(22층)에서 손상이 집중하고 있다. 또한 24층 모델에서의 예측치는 전체적으로 하층부에서 해석치보다 과소평가하는 경향이 있으나, 이것은 24층 모델은 고유주기가 길고 2차 모드의 영향이 크게 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 입력파에 의해 다소의 오차는 있으나, 예측치는 제1층에서의 손상집중현상을 적절하게 평가하고 있으며, n=3을 이용하여도 응답해석치보다 강도의 변화층에서의 손상집중을 과소평가하지 않고 각 층의 손상분포의 경향은 응답해석결과와 양호한 대응을 나타내고 있다. 따라서, (5)식의 값을 (4)식에 이용하면 강점 뿐만 아니라 반강점 접합부를 가지는 보봉괴형 다층골조의 손상분포를 예측가능할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

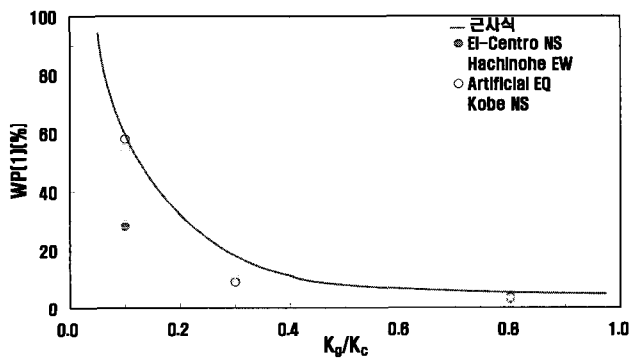
접합부가 강점인 경우 뿐만 아니라 핀 접합 및 반강



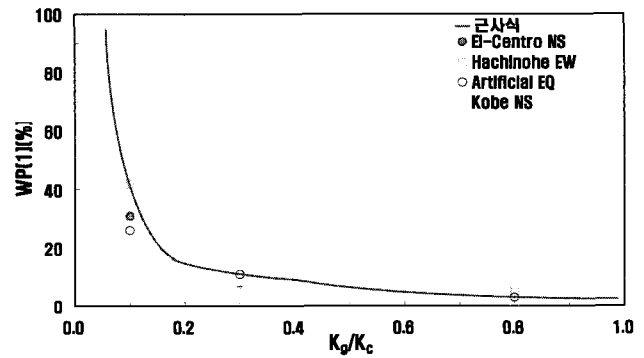
(1) 6층



(2) 9층

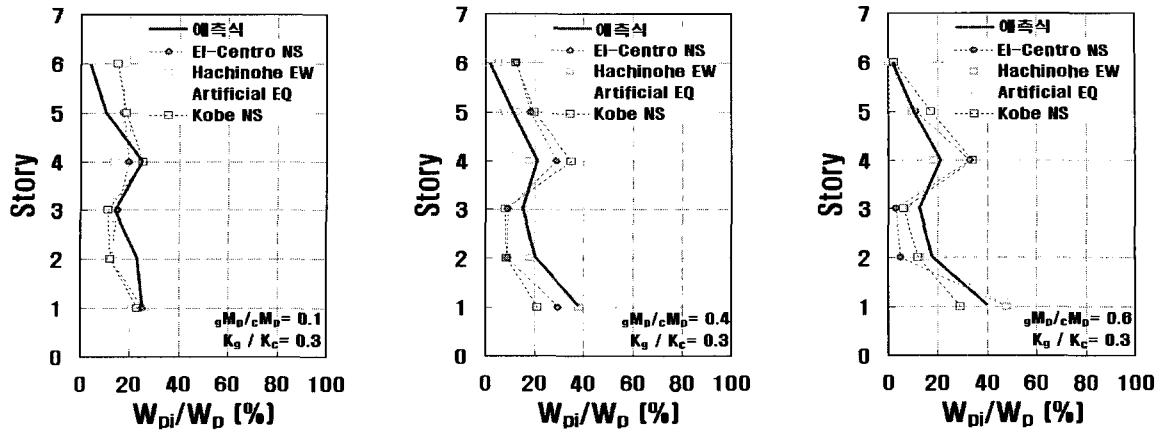


(3) 15층

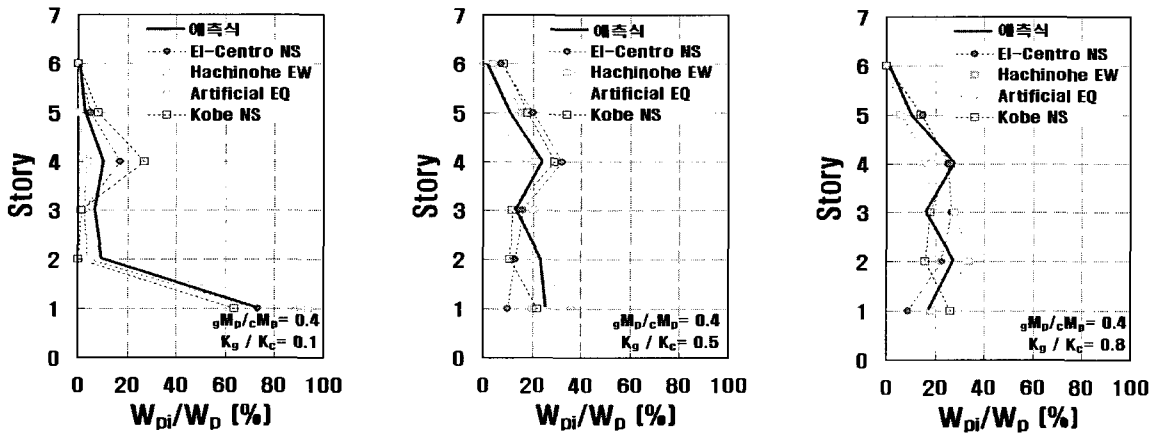


(4) 24층

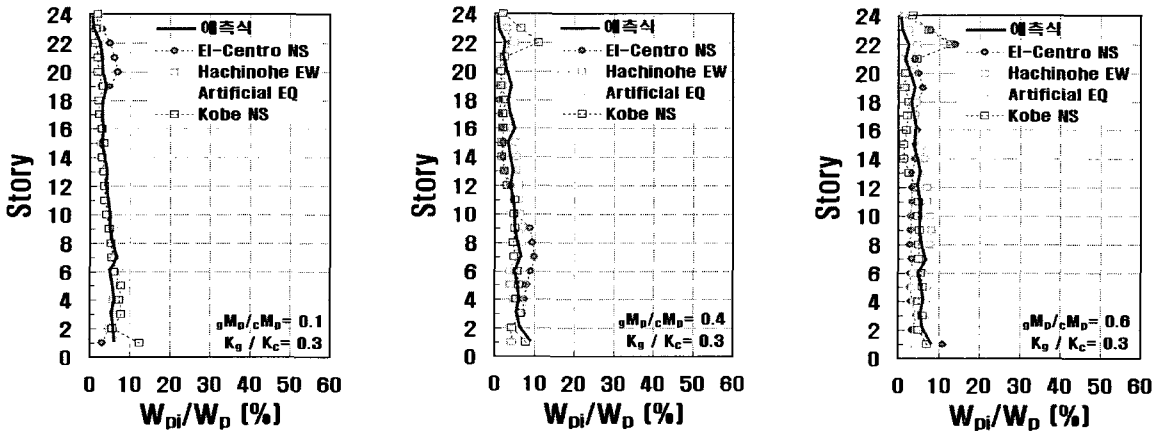
그림 10. 제1층의 손상집중율



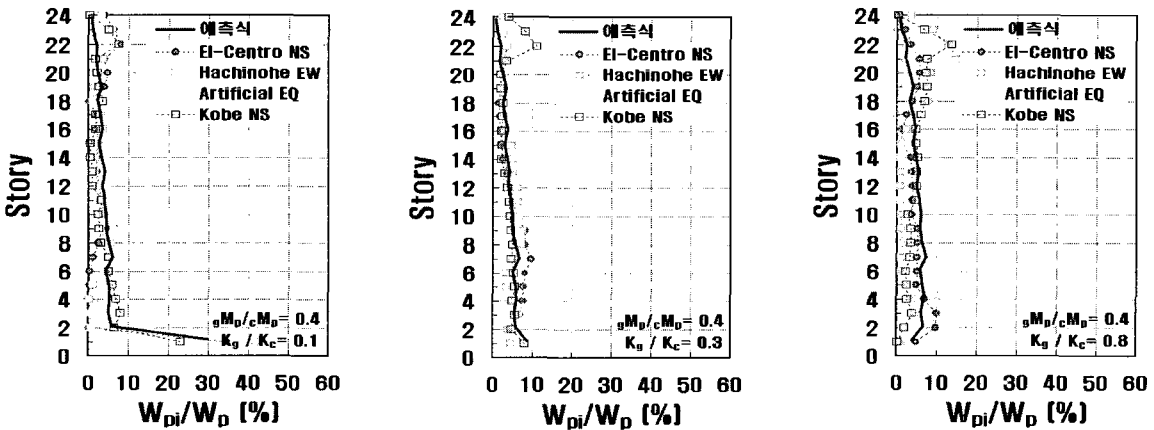
(a) 보기동 내력비에 따른 각층의 손상분포(6층)



(b) 보기동 강성비에 따른 각층의 손상분포(6층)



(c) 보기동 내력비에 따른 각층의 손상분포(24층)



(d) 보기동 강성비에 따른 각층의 손상분포(24층)

그림 11. 예측식과 해석결과와의 비교

접 접합된 보붕괴형 다층골조의 지진 응답 특성을 파악하기 위하여, 보기둥 내력비 및 강성비를 변수로 하여 수행한 탄소성 응답해석 결과로부터 보붕괴형 골조의 높이방향의 손상분포식을 구한 결과 다음의 사항에 대해 알게 되었다.

- 1) 보기둥 내력비를 작게 할수록 제1층에서의 손상집중을 완화할 수 있었고, 골조는 보붕괴형 메커니즘을 형성하기 쉽다. 그러나 접합부 플랜지면의 회전강성이 편접합 혹은 편에 가까운 반강접 접합부로 설계되어 있는 경우에는 접합부 플랜지면의 회전강성과 보부재의 탄성회전강성의 직렬 강성으로 정의한 보힌지부의 강성이 낮아져 보기둥 강성비가 0.3이하가 되면 보기둥 내력비를 작게하여도 제1층에서의 손상집중은 크게 되므로 반강접 접합부의 강성을 어느 정도 확보해야 할 것이다. 그러나 보의 강성이 어느 정도 확보하고 보기둥 내력비를 작게 하면 제1층의 기둥에서의 손상집중은 완화되고, 손상은 각 층에 균등히 분산되는 경향을 나타낸다.
- 2) 보 붕괴형 골조의 높이방향이 손상분포를 예측하기 위해 Akiyama에 의해 제시된(4)식은 강접 골조에서는 어느 정도 손상분포를 예측할 수 있으나, 편접합 혹은 반강접 접합된 경우에는 손상분포를 예측하기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 반강접 접합된 보 붕괴형 다층골조의 손상분포를 예측하기 위해 제1층의 P_1 의 평가식 (5)를 제시하였다. (5)식의 P_1 을 (4)식에 대입한 경우 반강접 및 강접 접합부를 가지

는 보 붕괴형 다층골조의 손상분포를 양호하게 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 建築物 耐震設計にける保有耐力と變形能力(1990), 日本建築學會, 1990年.
2. 秋山 宏, “地震時における鋼構造ラーメン骨組の損傷分布則”, 日本建築學會 論文報告集, 第 309号, pp. 9-18, 1981.11.
3. 寺本 隆辛, 北村 春辛, “鋼構造ラーメン架構の強震時彈塑性應答性伏-柱/はり耐力高さ方向耐力分布が應答に与える影響-日本建築學會 構造系 論文集, 第 363号, pp. 57-66, 1986.
4. 오상훈, "지진응답해석에 의한 보항복형 강구조 다층골조의 손상분포", 한국지진공학회 2000년도 춘계학술발표논문집, pp. 241-248, 2000.3.
5. 秋山 宏, 建築物の耐震極限設計 第2版, 東京大學出版會, 1987年.
6. 문태섭, 오상훈, 이선욱 "지진 입력 에너지에 의한 에너지 동가 속도 스펙트럼의 제안", 대한건축학회 논문집 구조계 16권 4호, pp. 3-9, 2000. 4.
7. 楊雪松, 桑村仁, 秋山 宏 : “バイリニア型のエネルギー入力速度換算スペクトルを特つ人工地震波の作成に関する研究”, 日本建築學會 關東支部研究報告漢, 1991, pp. 29-32.