

지진 응답해석에 의한 보항복형 강구조 다층골조의 손상분포

Damage Distribution of Weak Beam Type Multi-Story Steel Frames By Seismic Response Analysis

오상훈*
Oh, Sang-Hoon

문태섭**
Moon, Tae-Sup

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 ratio of beam and column becomes small, damage concentrate on the lower end of columns of the first story. 2) Considering the strength and stiffness ratios of beam and column with weak beam type mechanism, the equations predicting the damage distribution of multi-story steel frames were proposed.

1. 서론

다층골조의 설계에서는 구조물 각 부의 손상분포를 예측하는 것은 가장 중요하다고 할 수 있다.¹ 기둥 항복형의 골조는 제 1층 및 내력 변화층의 손상 집중 현상이 현저하게 발생하고 있으나, 보 항복형 골조는 기둥 항복형 골조보다 특정층에 집중된 손상이 인접층으로 분산되는 경향을 가지고 있으므로 내진적으로 유리한 구조형식임이 밝혀져 있다. 그러나, 지금까지의 보 항복형 골조를 해석모델로 다룬 연구^{7, 8, 9}는 보의 강성이 어느 정도 확보된 모델에 대하여, 높이 방향의 각 층의 내력 분포에 대한 손상 분포를 다룬 것이 대부분이다.

필자는 반강접 골조의 응답해석 결과로부터 같은 내력을 지니는 골조에서도 보의 강성이 기둥에 비하여 상당히 작은 경우는 최하층부 또는 내력 변화층에서 손상집중을 초래하는 원인이 됨을 규명했다⁹.

본 연구에서는 보항복형 메카니즘을 지니는 골조를 설계에 폭넓게 활용하기 위하여 보기등 내력비, 보기등 강성비를 parameter로 한 탄소성 지진응답 해석결과에 기초하여, 각 parameter가 보항복형 다층골조의 응답특성에 미치는 영향을 정성적으로 평가하고, 각 층의 손상 분포를 예측하기 위한 예측식을 제안하고자 한다.

2. 해석 모델 및 해석 방법

2.1 해석 모델의 개요

본 해석에서는 그림 1에 표시한 것과 같은 무한 균등 라멘을 해석모델로서 사용하였다. 층고는 전층 4m, 스패는 8m, 1스패 당의 층중량은 50ton으로 하였으며, 각 절점에 집중하중으로 작용하게 한다. 해석 모델의 층수는 6층, 9층, 15층, 24층이다. 또한, 기준 전단력 계수분포는 최적항

* 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원

** 한양대학교 건축공학부 교수, 포항제철 석좌교수 - 241 -

복전단력 계수분포¹⁾에 따르고, 부재 단면은 3층마다 동일한 단면으로 한다.

2.2 모델 설계 parameter

해석 모델의 설계 parameter에 대해서는 기둥에 대한 보의 내력비 및 강성비를 다음과 같이 정의하고 설계 parameter로 이용하였다.

$$\text{보기둥 내력비} = {}_gM_p / {}_cM_p$$

$$\text{보기둥 강성비} = K_g / K_c$$

여기서, ${}_gM_p$: 보의 전소성 모멘트

${}_cM_p$: 축력을 고려한 기둥의 전소성모멘트

K_g : 반곡점이 부재 중앙에 있을 때의 보 힌지의 회전강성

K_c : 반곡점이 부재 중앙에 있을 때의 기둥 힌지의 회전강성

각 parameter의 값은 다음의 값을 사용하였다.

- 보기둥 내력비 : 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
- 보기둥 강성비 : 0.1, 0.3, 0.5, 0.8

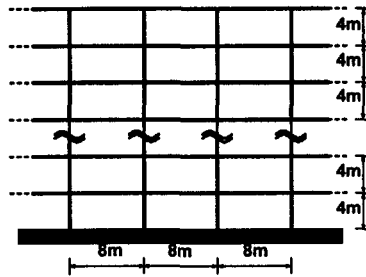


그림 1 해석 모델(무한 균등 라멘)

2.3 해석방법

해석에 사용한 입력파는 El-Centro NS파(계속시간 54초), Hachinohe EW파(계속시간 30초), Kobe NS파(계속시간 30초), bi-linear형의 에너지-스펙트럼을 지니는 인공지진파¹⁰⁾(계속시간 30초)를 이용하였다. 수치적분법은 평균가속도법을 사용하였고 감쇠는 없는 것으로 가정하였다. 지진파에 따라 해석 모델의 소성화 정도가 작은 경우는 손상 집중률을 과대평가할 경우가 있으므로, 충분한 소성변형을 할 수 있도록 지진파의 가속도에 배율을 곱하여 지진 입력 에너지의 크기를 조절하였다. 기둥 혹은 보 부재중 어느 한 곳의 부재단 힌지가 요구변형능력(η)에 도달한 경우를 골조가 한계상태에 도달하는 것으로 판단하고 해석을 종료하였다. 또한, 각 부재의 복원력 특성 모델을 완전 탄소성형으로 하였다.

3. 해석결과

3.1 제 1층에의 손상집중률

각 모델에 대한 응답해석결과에서는, 제2층 이상의 기둥은 대부분 탄성에 머무르고, 각 층의 손상도는 어느 정도 균등히 분배되었다. 한편, 제 1층에서는 각 해석 parameter에 의한 손상집중률의 변화가 크게 나타났으므로, 우선 제 1층에의 손상집중률을 중심으로 해석결과를 정리하였다.

3.1.1 보기등 내력비의 변화에 의한 손상 집중률

보기등 강성비를 0.3, 0.8로 하였을 때, 보기등 내력비(${}_gM_p / {}_cM_p$)에 대응한 한계상태에서의 제 1층에의 손상집중률을 그림 2에 나타내었다. 종축은 골조전체에서 흡수한 소성변형 에너지에 대한 제 1층에서 흡수한 소성변형 에너지의 비율이고, 횡축은 보기등 내력비를 나타낸다. 해석 모델의 층수에 관계없이 보기등 강성비가 0.3일 때는 보기등 내력비가 크게 될수록 제1층의 손상 집중률은 크게 되고, 입력지진파에 의한 편차도 크게 나타나고 있다. 그러나, 보기등 강성비가 0.8이 되면 보기등 내력비의 변화가 제 1층에의 손상집중률에 미치는 영향은 작게 되고, 입력지진파에 의한 편차도 작아지고 있다. 이것은 보기등 강성비가 작은 경우는 보기등 내력비가 크게

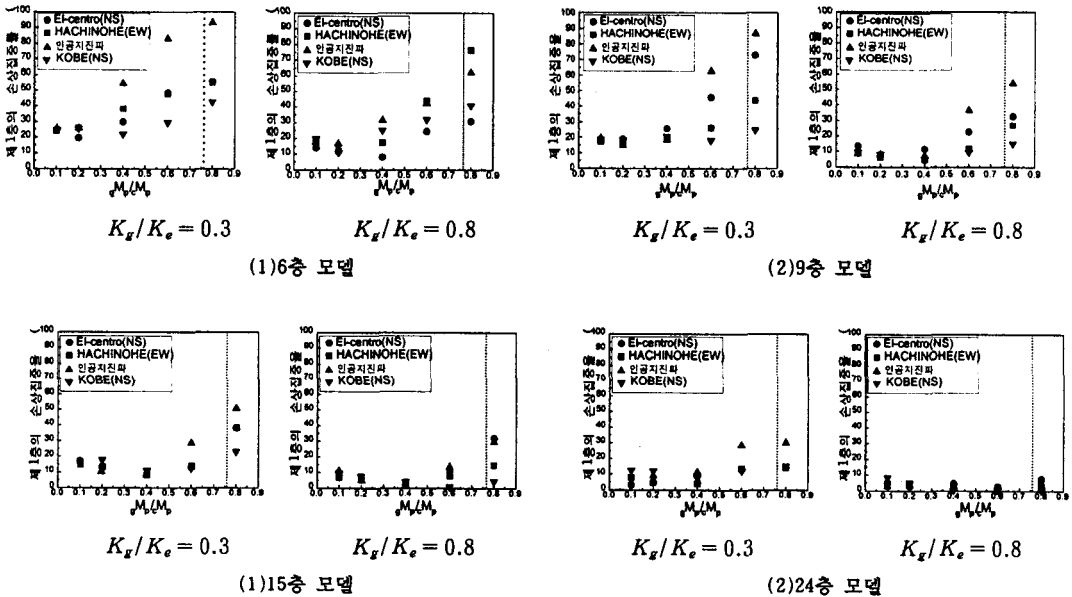


그림 2 제 1층의 손상집중률

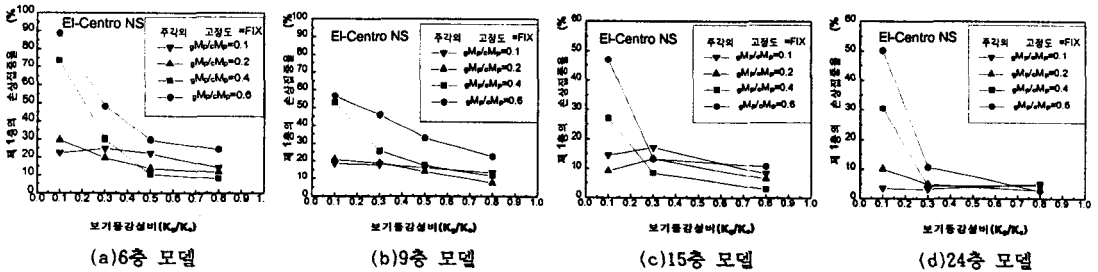


그림 3 보기등 강성비에 따른 제 1층의 손상집중률

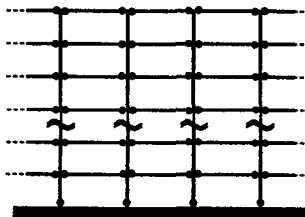


그림 4 항복 메카니즘

될수록 보의 항복변형의 변화량이 크게 되므로, 제 1층의 기둥 하단부에서의 손상집중률의 변화가 크게 되어 제 1층에서의 손상 집중률의 변화도 크게 나타나는 반면, 보의 강성비가 어느 정도 확보 되게 되면, 보의 내력이 크게 되어도 항복변형의 변화량은 그다지 크지 않으므로 보기둥 내력비의 변화에 의한 제 1층에서의 손상집중률의 변화도 그다지 크지 않았던 것으로 판단된다.

또한, 보기둥 내력비가 0.8인 경우는 기둥이 보보다 먼저 한계상태에 이르게 되어, 기둥 항복형 메카니즘을 형성하고 있다. 이것은 평면 골조가 보 항복형 골조를 형성하기 위해서는 기둥의 내력이 보의 내력보다 1.3배 이상(굵은 점선) 필요하다는 것이 이미 밝혀져 있지만⁸ 보기둥 내력비 0.8의 경우는 보의 내력에 대한 기둥의 상대 내력이 작게 되어 이 조건을 만족시키지 못하고 있기 때문이다.

3.1.2 보기둥 강성비의 변화에 의한 손상 집중률

보기둥 강성비를 parameter로 하여 E1-Centro NS파를 입력시켰을 때의 보기둥 강성비의 변화에 의한 한계상태에서의 제1층에서의 손상집중률을 그림 3에 나타내었다. 종축은 골조 전체에서 흡수한 소성변형 에너지에 대한 제 1층에서 흡수한 소성변형에너지의 비율이고, 횡축은 보기둥 강성비를 표시하고 있다. 보기둥 내력비가 작게 되어 기둥에 대한 보의 상대내력이 작은 모델일수록 보기둥 강성비의 변화에 의한 영향은 작게 나타나고 있으며 보기둥 내력비가 0.6, 0.8인 모델은 보기둥 강성비가 0.3이하의 범위에서 제 1층에서의 손상집중이 현저하게 나타나고 있다. 이것은 보기둥 내력비가 같아도, 보의 강성이 작아질수록 보의 항복변형량이 크게 되어 제 1층 기둥의 하단부가 상당히 소성화된 단계에서도 보가 항복하기 전에 탄성변화량에 여유가 있으므로, 보는 별로 소성화되지 않았기 때문이다.

3.2 손상분포척

보 항복형 골조에 대한 높이 방향의 누적소성변형 에너지(손상)분포척으로 하여 Akiyama⁷는 다음과 같이 제안했다.

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

여기서, $Q_j = \left(\sum_{k=j}^N m_k \right) a_j / M$

- a_j : 최적항복 전단력계수분포
- a_i : i 층의 항복전단력계수 분포
- M : 구조물의 총질량

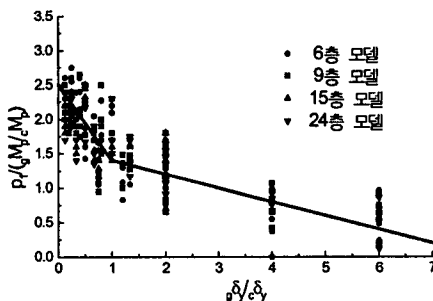


그림 5 P_1 값

또한, $P_i = (a_i / a_1) / a_i$ 는 실제의 항복강도의 분포와 최적 항복전단력계수 분포¹⁾와의 차이를 나타내고 있고, P_i 가 작은 층일수록 손상집중이 일어나기 쉽다. 손상집중지수 n 은 실제의 항복전단력계수와 최적항복 전단력계수의 차이에 대한 손상 집중의 민감도를 나타내고 있으며, n 값이 클수록 손상집중이 일어나기 쉽다는 것을 의미하고 있다. 보항복형 골조에 대하여 Akiyama은 $n=6$ 의 값을 제안했다.¹⁾ 한편, 그림 4과 같이 전체 붕괴 메카니즘을 설정하고, 각 층의 내력을 계산하면 보보다 기둥의 내력이 크게 되어 제 1층의 내력이 크게 되므로, 각 층의 내력을 parameter로 하여 손상 분포를 예측한 식(1)에서는 제 1층에는 거의 손상이 일어나지 않게 된다. 그러나, 그림 3에 표시한 응답해석 결과와 같이 같은 내력을 지니는 골조에서도 각 부재별 강성비가 제 1층에의 손상집중요소로 작용하게 되고, 강성비가 작게 되면 제 1층에 손상이 집중하게 된다. 한편, 제 2층 이상의 층에서는 기둥에 거의 손상이 일어나지 않고, 연성효과에 의해 손상은 각 층에 분산되어 매우 안정된 손상 분포를 보이고 있다. 따라서, 제 1층의 손상집중 현상을 평가하기 위해서는 제 1층의 b_1 을 적절히 평가해야 할 필요가 있다. 그 때, 제 1층의 손상 집중을 평가하기 위해서는 b_1 의 값이 작아지고, n 은 b_1 에 의존하는 경향이 있으므로, 2층 이상의 층에서는 n 의 값을 3이하로 설정하는 것도 가능하다.¹¹⁾ 여기서는, $n=3$ 을 이용하여 식(1) 중의 b_1 이 어느 정도의 값이 되면 응답해석으로부터 얻어낸 값이 되는가를 조사하여 그림 5에 나타내었다.

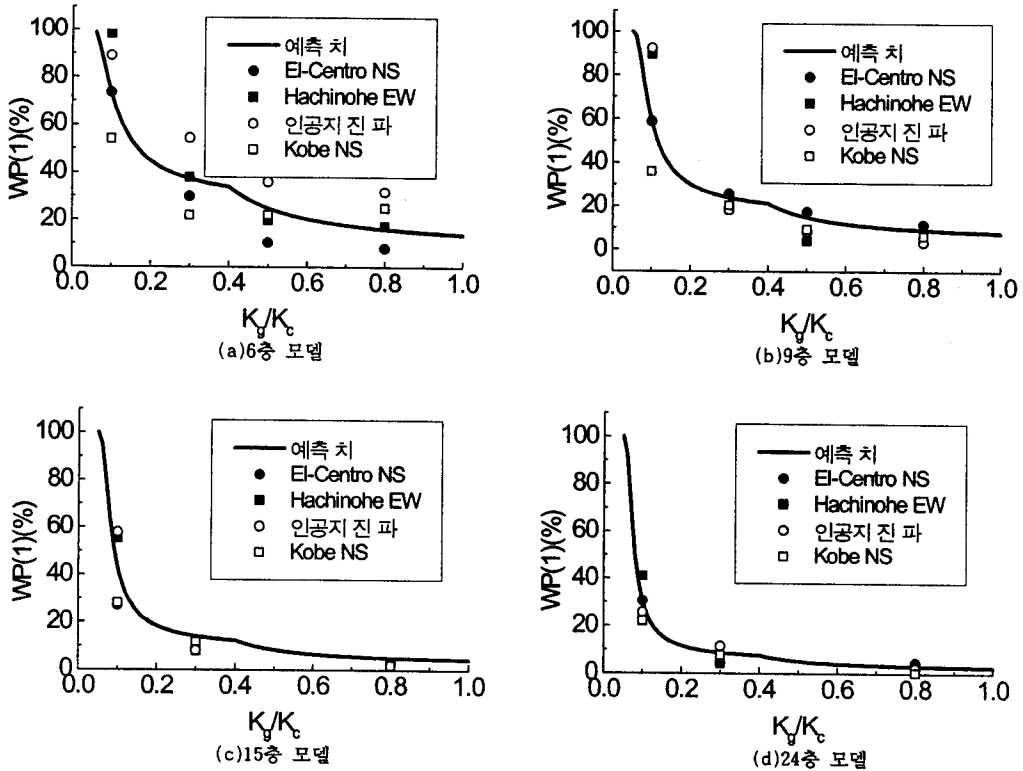
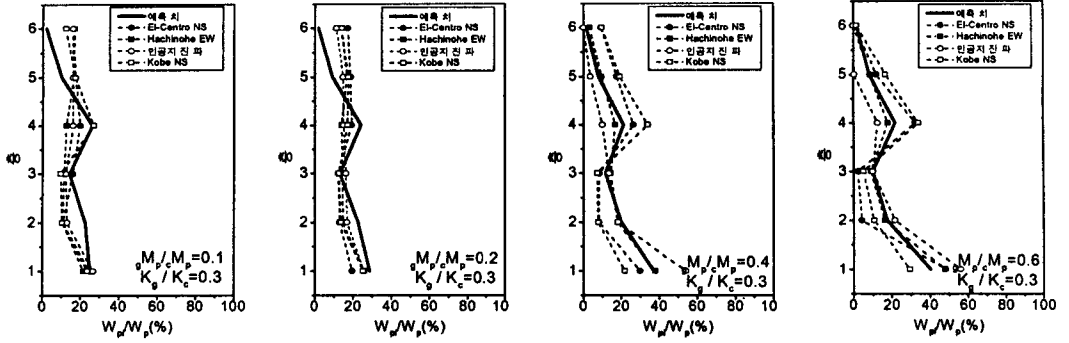
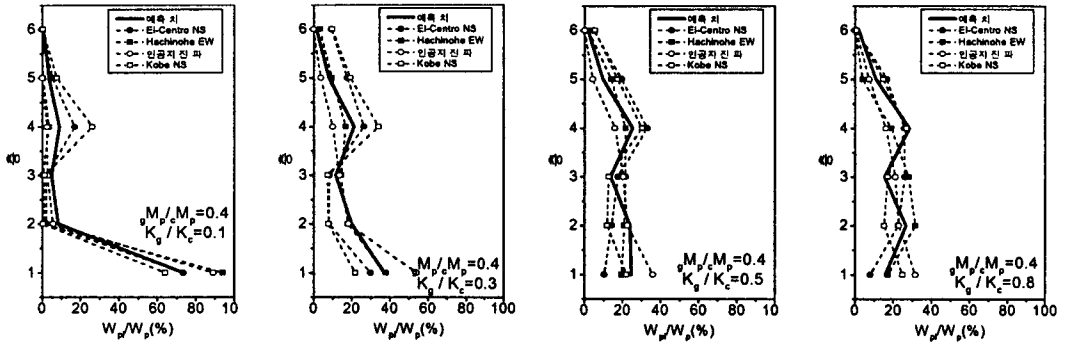


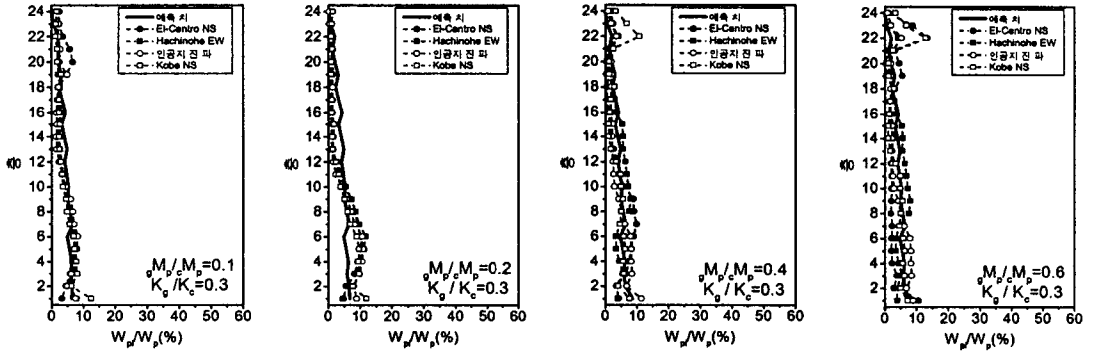
그림 6 제 1층에의 손상 집중률($M_p/M_b=0.4$)



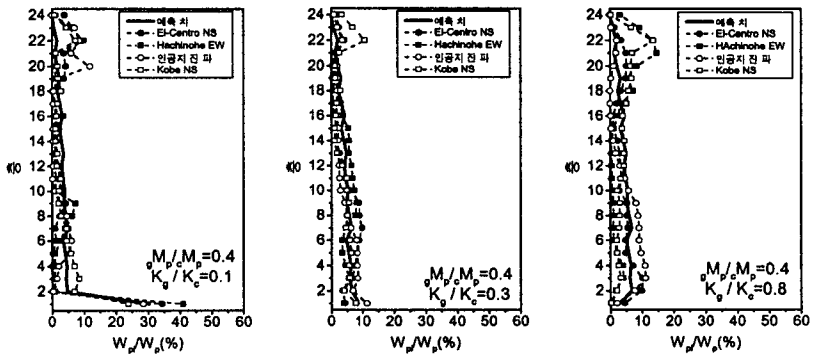
(a) 보기동 내력비에 따른 손상분포(6층 모델)



(b) 보기동 강성비에 따른 손상분포(6층 모델)



(c) 보기동 내력비에 따른 각 층의 손상분포(24층 모델)



(d) 보기동 강성비에 따른 각 층의 손상분포(24층 모델)

그림 7 각 층의 손상분포

그림 5에서 ${}_g\delta_y (= {}_gM_p / K_g)$ 는 보의 항복변형, ${}_c\delta_y (= M_c / K_c)$ 는 기둥의 항복변형이다. 그림에 나타난 결과는 다소 편차가 발생하고 있지만, ρ_1 는 다음과 같은 식으로 근사시킬 수 있으며, 그 결과를 그림 중에 굵은 선으로 나타내었다.

① ${}_g\delta_y / {}_c\delta_y \leq 1$ 의 경우

$$P_1 = \frac{{}_gM_p}{{}_cM_p} \left(2.5 - 1.1 \cdot \frac{{}_gM_p}{{}_cM_p} \frac{K_c}{K_g} \right) \quad (2.a)$$

② ${}_g\delta_y / {}_c\delta_y > 1$ 의 경우

$$P_1 = \frac{{}_gM_p}{{}_cM_p} \left(1.6 - 0.2 \cdot \frac{{}_gM_p}{{}_cM_p} \frac{K_c}{K_g} \right) \quad (2.b)$$

그림 6은 보기둥 강성비의 변화에 의한 제 1층의 손상 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 종축은 식(2)으로부터 구한 ρ_1 을 이용하여 식(1)의 손상분포 예측식에 의해 구한 제 1층에의 손상분포이다. 굵은 선으로 표시한 예측식은 각 부재별 내력비, 강성비, 골조의 층수 및 입력지진파와 관계된 응답해석치와 양호한 대응을 보이고 있다.

또한, 6층, 24층 모델에 대한 각 층의 손상 분포를 그림 7에 표시하였다. 종축은 각 층을 나타내고 있고, 횡축은 골조전체에서 흡수한 소성변형 에너지에 대한 각 층에서 흡수한 소성변형 에너지의 비율이다. 6층 모델의 예측치에서는 상층부(5층, 6층)의 손상을 과소평가하는 경향이 있다. 24층 모델의 보기둥 강성비가 0.1인 모델에서는 지진파에 의한 편차가 크고, Kobe NS파의 경우 상층부(22층)에서 손상이 집중하고 있다. 또한 24층 모델에서는 예측치는 전체적으로 하층부에서 해석결과보다 과소평가하는 경향이 있으나, 이는 24층 모델에서는 고유주기가 길어지고, 2차 모드의 영향이 크게 되었기 때문이라고 사료된다. 그러나, 입력파에 의해서 다소의 차이는 있지만, 예측식은 제1층에의 손상 집중 현상을 적절히 평가하면서 전체적으로는 $n=3$ 을 이용해도, 응답해석치보다 강도의 변화층에서의 손상 집중을 과소 평가하지 않고, 각 층의 손상 분포의 경향은 응답 해석결과와 양호한 대응을 보여주고 있다.

4. 결론

보기둥 내력비, 강성비를 parameter로 하여 실시한 탄소성 응답 해석결과로부터 보항복형 골조의 높이 방향의 손상 분포 경향을 분석한 결과 다음 사항에 대한 결론을 얻을 수 있었다.

1) 보기둥 내력비를 작게 할 수록 제1층에의 손상집중을 완화시킬 수 있으며, 또한 골조는 보항복형 메카니즘을 형성하기 쉬워진다. 그러나, 보기둥 강성비를 0.3이하로 하면, 보기둥 내력비를 작게 하더라도 제 1층에의 손상 집중률은 크게 되므로, 보의 강성을 어느 정도 확보하지 않으면 안된다. 그러나, 보의 강성이 어느 정도 확보된 상태에서 보기둥 내력비가 작게되면 제 1층의 기둥에의 손상 집중은 완화되고, 손상은 각 층에 균등히 분산되는 경향을 나타내었다.

2) 보항복형 골조의 높이 방향의 손상 분포를 예측하기 위한 손상 분포척 식(1)은 각 층의 내력을 parameter로 한 것으로 각 부재별 내력비 및 강성비의 영향을 반영하고 있다. 그것들의 영향을 고려한 예측식을 얻기 위하여 보기둥의 내력비, 강성비를 parameter로 하여 실시한 지진응답 해석결과로부터 제 1층의 ρ_1 의 평가식 식(2)를 얻었다. 식(2)의 ρ_1 을 식(1)에서 이용할 경우, 손상집중지수 n 을 3으로 설정하여도 내력변화층의 손상 집중을 과소평가하지 않고 해석결과와 적절한 대응을 나타내었다.

참고문헌

1. 秋山 宏(1987), “建築物の耐震極限設計”, 東京大學出版會, 第2版
2. 日本建築學會(1990), “建築耐震設計における保有耐力と變形性能”, PP. 261-294
3. 秋山 宏(1985), “鐵骨柱脚の耐震設計”, 技報堂出版, PP. 71-85
4. 山田 哲, 秋山 宏(1994), “局部座屈を伴う鋼部材の舉動に立脚した多層骨組の彈塑性応答解析, 日本建築學會構造系論文集, 第463号, pp.125-133
5. 兼光 知巳, 矢部 喜堂, 眞瀬 伸治(1991), “地震力を受けるせん斷型多層骨組の損傷分布に関する研究, 構造工學論文集, vol. 37B, pp.101-110
6. 加藤 勉, 秋山 宏(1976), “地震時におけるせん斷型多層骨組の倒壞條件”, 日本建築學會論文報告集, 第244号, pp. 33-39
7. 秋山 宏(1983), “はり降伏型鋼構造多層骨組の D_s 値, 日本建築學會論文報告集, 第332号, pp. 38-45
8. 寺本 隆辛, 北村 春辛(1986), “鋼構造ラーメン架構の強震時彈塑性應答性狀-柱/はり耐力比と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
9. 吳相勳, 水谷 造之, 山田 哲, 秋山 宏(1996), “地震時における半剛接骨組の損傷分布-その2 解析結果”, 日本建築學會大會學術講演梗概集(近畿), pp. 575-576
10. 楊 雪松, 桑村 仁, 秋山 宏(1991), “バイリニア型のエネルギー入力速度換算スペクトルを持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集, pp. 29-32
11. 秋山 宏(1995), “耐震性能の多様化に對應した耐震設計”, 日本建築學會構造系論文集, 第472号, pp. 85-90

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터(STRESS)와 포항산업과학연구소의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.