

수평력과 축력을 받는 강골조의 최대수평내력 평가

Evaluation of the Lateral Ultimate Strength of Steel Moment Resisting Frames under Axial and lateral Forces

김 종 성¹⁾

Kim, Jong Sung

요 약 : 구조물이 지진과 같은 수평력을 받으면 골조의 기둥은 횡이동을 하게 되고 이 횡이동이 크면 골조는 불안정 좌굴, 초기항복, 골조전체의 강성이 감소하게 된다. 본 연구에서는 이러한 골조의 기둥이 횡이동에 의해 수평력과 축력을 동시에 받는 강골조를 대상으로하여 골조강성의 저하, 보와 기둥의 상대적인 강성비, 세장비효과, 하중조건 등을 고려한 다양한 해석모델을 상정하여 수치해석을 실시했다. 그 해석결과를 분석하여 강골조의 최대수평내력을 평가하고, 기둥의 세장비 제한치를 구하는 절차에 대해서도 검토한다. 해석에 있어서는, 골조의 P Δ 효과를 고려해서 기발표된 저자의 탄소성해석법을 이용하여 일정한 축력하에 점증의 수평력을 골조에 가했으며, 최대내력후의 해법으로서 일반역행렬을 응용했다.

ABSTRACT : When the lateral forces are applied to a frame, columns in the frame are usually accompanied with sidesway. If this sidesway is large, the frame is subjected to buckling and an early yielding of members which reduces the overall frame stiffness. In this study, numerical analysis of frames were conducted to evaluate the ultimate lateral strength of steel moment resisting frames permitted to sidesway under axial and lateral forces, and develop the procedure for determining the limits of column slenderness ratios. In the numerical analysis, the effects of the relative stiffness ratio between beam and column, deterioration of overall frame stiffness, slenderness ratio and loading conditions were considered.

The elasto-plastic analysis method in which the P- Δ effect is implemented, presented by the author previously, was adopted in the analysis. Incremental lateral forces were applied to the frame under constant axial loads and the generalized inverse is employed for the post-ultimate behavior.

핵심용어 : 횡이동, P- Δ 효과, 최대수평내력, 탄소성해석, 세장비제한, 일반역행렬

KEYWORDS : Sidesway, P- Δ effect, lateral ultimate strength, elasto-plastic analysis, limits of slenderness ratio, generalized inverse

1) 정회원, 경일대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 구조물이 지진이나 바람과 같이 수평력을 받으면 기둥은 횡이동(Sidesway, 주각에대한 주두의 상대적인 횡방향 이동)을 동반하게 된다. 이 횡이동이 크면 골조는 소위 P- Δ 효과에 의해 불안정좌굴을 하게 되고 초기항복을 초래하고 골조전체의 강성을 저하시켜서 파괴모드를 소성에서 불안정모드로 변화시키게 된다. 따라서 횡이동이 허용되는 골조의 내진설계를위한 구조설계에서는 골조전체의 강성평가가 매우 중요한 문제이다.

현행의 강구조설계규준^{1), 2)}에서 정하고 있는 골조의 안정문제는 개재(個材)의 강도, 강성설계를 기본으로 한 허용응력도설계법에 근거하고 있고, LFRD규준(안)³⁾에서는, 골조설계시, 골조에 작용하는 연직하중 및 변위에 의한 2차(P- Δ 효과)를 고려하도록 되어 있으며, 비가새골조에서 구조해석에 2차효과를 포함하는 경우는 유효좌굴길이계수(k-factor)는 1.0으로 할 수 있다고 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 횡이동에 의한 골조의 P- Δ 효과를 고려한 탄소성해석기법^{4), 5)}을 이용하여 다양한 해석모델을 상정해서 수치해석을 하고 그 결과를 분석하여, Euler의 좌굴하중에서 골조의 수평내력을 평가할 수 있는지?, 본 연구에서의 해석기법이 횡이동을 동반하는 골조의 탄소성거동을 합리적으로 추적할 수 있는지? 에 관심을 갖고 최대수평내력을 평가하며, 해석결과를 이용해서 골조의 소요수평내력에 대한 골조기둥의 축력비 및 세장비의 제한치를 추정하는 순서에 대해서도 검토한다. 해석에 있어서는 일정한 축력비를 가한 후에 점증수평력을 골조에 가했으며, 골조는 H형강 및 box형강으로 조립한 것을 해석의 대상으로 하였다.

2. 탄소성해석기법

본 연구에서 사용한 해석기법³⁾은 부재 축방향의 소성영역확산에 의한 강성저하부분을, 강성저하계

수에 의해 저감된 가상단면을 갖는 선재(線材)로 간주한 해석수법으로서, 구조물의 횡이동과 축력에 의한 기둥의 소성변형에 의한 강성저하는, 축력과 그 방향의 변동이 없고 횡이동에 의한 요소의 회전 때문에 생기는 기하학적인 비선형효과를 무시하면, 일단고정, 타단자유인 기둥부재에 일정축력이 존재하고 여기에 점증수평력에 의한 휨모멘트가 가해진 경우의 소성변형에 의한 강성저하와 동등하다. 따라서 본 연구에서는 강성저하계수⁵⁾(등가휨강성계수 β , 등가축강성계수 η)를 축력의 함수로 표현해서, 일정한 수평처짐하에 연직력만을 증가시키는 탄소성좌굴해석⁵⁾을 할 수 있을 뿐만아니라, 일정축력에 수평력을 점증시켜서 골조의 최대수평내력을 평가할 수 있다는 데 그 특징이 있다.

해석상의 가정은 다음과 같다. 첫째 tri-linear로 가정된 σ - ϵ 곡선을 사용하여 구한 탄소성휨모멘트-곡률 관계식의 엄밀해를 구하고, 부재의 축방향의 소성확산을 고려한 β 와 η 함수를 위의 모멘트-곡률관계식으로 부터 평가한다. 그리고 해석에서는 전단력의 영향을 무시하고 휨변형만을 고려했으며, 기둥의 변형은 기둥의 중앙점에서 상하대칭으로 하고, 부재의 중앙에서 2등분한 캔티레버 기둥으로 간주했다. 또한 횡이동에 의한 기둥부재의 수축만을 고려하고 휨변형에 의한 수축은 무시했다.

이상의 가정하에서, 부재의 절점이 가상변위에 의해서 절점력이 하는 일과 부재의 응력이 하는 일이 같다는 가상 일의 식으로부터 평형방정식을 얻어서 구조물의 최대내력점을 포함한 최대내력후의 해법으로서 일반역행렬⁷⁾을 이용한 일반증분법을 응용했다.

3. 수치해석

전술한 골조의 탄소성해석기법을 이용하여, 그림 1과 같이 다양한 해석모델에 대해서 수치해석을 하고 골조의 탄소성거동을 고찰한다.

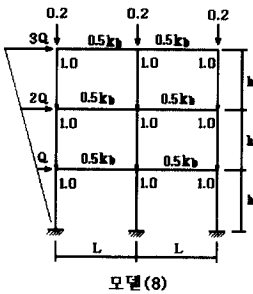
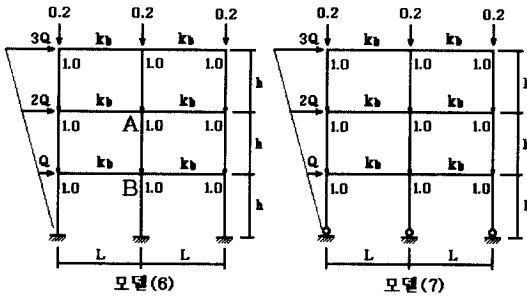
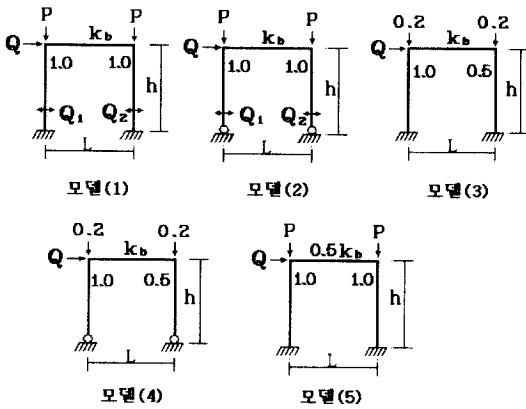


그림 1. 해석모델

해석결과를 나타내는 주요 파라미터는 다음과 같다.

$$Q_{cr}/Q_p, Q_1/Q_p, Q_2/Q_p, \dots$$

$$\sqrt{P_y/P_{el}}, \sqrt{P_y/P_{e1}}, \sqrt{P_y/P_{e2}}$$

여기서,

Q_{cr} : 해석에 의한 골조의 탄소성 최대수평내력

Q_p : 소성힌지법에 의한 붕괴하중

Q_1, Q_2 : 라-멘에서 좌우 기둥재의 전단력

P_{el} : 해석에 의한 골조전체의 탄소성좌굴하중

P_{e1}, P_{e2} : 횡이동이 허용된 경우, 기둥 1개의

Euler좌굴하중(주각고정, 주각핀)

$$\sqrt{P_y/P_{el}} = \sqrt{\sigma_y/E} \cdot \frac{\lambda_x}{\pi} \quad \text{에서} \quad \lambda_x = kh/i \text{ 이}$$

므로, $\sqrt{P_y/P_{el}}$ 은 광의(廣義)의 기둥재 세장비를 나타낸다.

한편 본 연구에서는 중간하중에 의한 영향이 적은 경우를 상정해서, 그림1에서와 같은 해석모델들을 택했다. 그림중에 나타난 보의 강비 k_b 는

$$k_b = \frac{\sum I_g/l_g}{\sum I_c/h_c} \quad (1)$$

단, I_c, l_g : 기둥, 보의 단면2차모멘트

h_c, l_g : 층고(기둥), 스패ん길이(보)

로 정의하고 l_g 를 변화시켜서 $k_b = 0.5, 1.0, 2.0$ 의 3종류의 계산을 한다. 표 1, 표 2는 골조해석용 입력데이터이다.

표 1. 골조해석용 입력데이터(SS400) (보, 기둥 : H형 단면)

| λ_x | i(cm) | A(cm ²) | I _x (cm ⁴) | P _y (t) | M _y (t·m) | M _p (t·m) | H×B×t _w ×t _r |
|-------------|-------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| 28.8 | 10.8 | 92.2 | 10,800 | 221 | 2,074 | 2,302 | 250×250×9×14 |
| 32.4 | 10.8 | 92.2 | 10,800 | 221 | 2,074 | 2,302 | 250×250×9×14 |
| 40.6 | 8.62 | 63.5 | 4,720 | 152 | 1,133 | 1,257 | 200×200×8×12 |
| 46.6 | 7.50 | 51.2 | 2,800 | 123 | 790 | 885 | 175×175×7×11 |
| 54.8 | 6.38 | 40.1 | 1,640 | 96.3 | 525 | 588 | 150×150×7×11 |
| 66.2 | 5.29 | 30.3 | 847 | 72.8 | 325 | 368 | 125×125×6.5×9 |
| 75.6 | 5.29 | 30.3 | 847 | 72.8 | 325 | 368 | 125×125×6.5×9 |
| 85.1 | 5.29 | 30.3 | 847 | 72.8 | 325 | 368 | 125×125×6.5×9 |
| 95.7 | 4.18 | 21.8 | 383 | 52.6 | 184 | 210 | 100×100×6×8 |

표 2. 골조해석용 입력데이터(SS400) (기둥 : Box형 단면)

| λ_x | I (cm) | A (cm ²) | I _x (cm ⁴) | P _y (t) | M _y (t·cm) | M _p (t·cm) | H×B×t (mm) |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| 29.9 | 11.7 | 134.5 | 18300 | 333 | 2928 | 3455 | 300×300×12 |
| 34.2 | " | " | " | " | " | " | " |
| 40.6 | " | " | " | " | " | " | " |
| 47.0 | " | " | " | " | " | " | " |
| 55.6 | " | " | " | " | " | " | " |
| 68.4 | " | " | " | " | " | " | " |
| 76.9 | " | " | " | " | " | " | " |
| 85.5 | " | " | " | " | " | " | " |

(보 : H형단면)

| λ_x | I (cm) | A (cm ²) | I _x (cm ⁴) | P _y (t) | M _y (t·cm) | M _p (t·cm) | H×B×t _w ×t _r (mm) |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| 29.9 | 18.6 | 96.8 | 33500 | 233 | 3573 | 4038 | 450×200×9×14 |
| 34.2 | " | " | " | " | " | " | " |
| 40.6 | " | " | " | " | " | " | " |
| 47.0 | " | " | " | " | " | " | " |
| 55.6 | " | " | " | " | " | " | " |
| 68.4 | " | " | " | " | " | " | " |
| 76.9 | " | " | " | " | " | " | " |
| 85.5 | " | " | " | " | " | " | " |

3.1 골조의 탄소성거동

해석결과를 나타내는 그림에서, H형은 기둥과 보를 표 1의 H형단면을 사용했으며, Box형은 표 2의 보는 H형, 기둥은 Box형단면을 사용했음을 의미한다.

1층 1스팬 골조

그림 2는 축력비(P/Py)가 0.2로 일정한 경우, 해석모델(1)의 결과로서, 세로축은 골조의 최대수평내력이고 가로축은 광의의 기둥재 세장비를 나타낸다. 다만, 그림 중의 △표시는 $k_b = 0.5$, ○표시는 $k_b = 1.0$, □표시는 $k_b = 2.0$ 의 경우를 표시한다. 그림 2(a)의 P_{e1} 은 골조전체의 탄성좌굴하중이고, 그림 2(b)의 P_{e1} 은 양단고정시의 기둥 1개의 Euler좌굴하중이다. 그림 2(a)는 k_b 에 의해서

각각 다른 곡선으로 나타내고 있어서 골조가 탄소성수평내력을 쉽게 구하지 못하게 되어 있으며, 또, 그림 2(b)의 좌굴하중 P_{e1} 은 실제의 골조전체의 좌굴하중 P_{e1} 과는 크게 다르며, 다소 크게 평가하고 있기 때문에, 소정의 최대수평력을 얻는데는 필요한 세장비는 다소 작게 평가되어 안전측의 설계가 되지만, 무차원량으로서의 탄성좌굴하중을 이용한 경우의 값과의 차이는 적다고 할 수 있다.

그림 3은 해석모델(2)의 주각 편인 경우 ((P/Py=0.2)의 결과로서, 그림 2에 비해서 k_b 에 의존하지 않고 거의 일직선으로 나타내져서 최대수평내력에 도달할때까지 안정성을 잃지 않을 세장비나 축력비에 관한 정보가 잘 포함되어 있는 그림이다.

그림 4는 최대수평력에 미치는 축력비의 영향을 나타낸 것이다. 세장비의 증대와 함께 최대수평력은 거의 직선적으로 감소하고, 그 직선의 경사는 축력비가 커지면 다소 급해지는 정도로서, 그 영향은 그다지 크지 않음을 나타낸다.

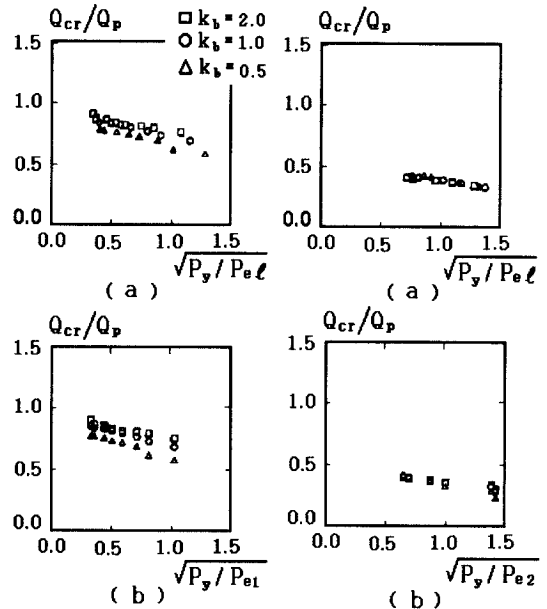


그림 2. 모델(1) H형

그림 3. 모델(2) H형

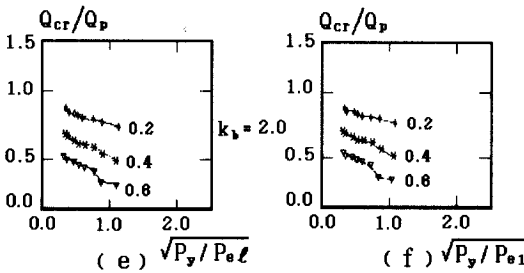
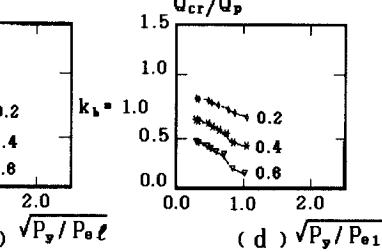
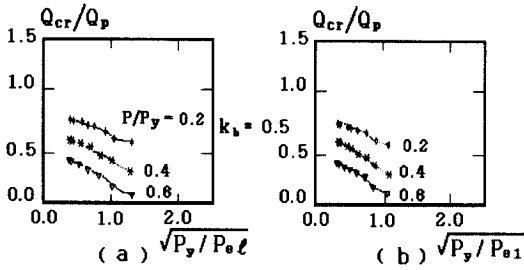


그림 4. 해석모델(1) H형

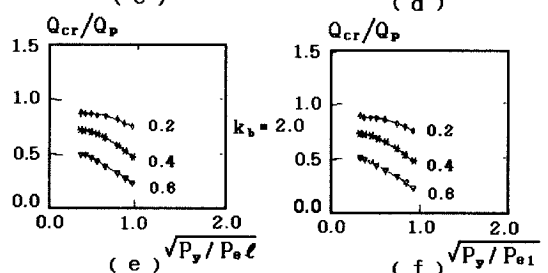
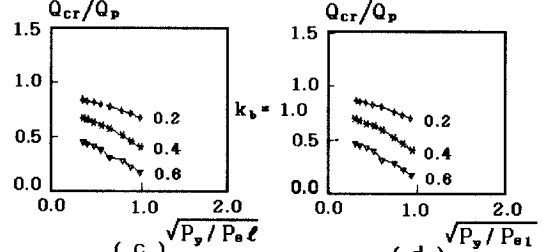
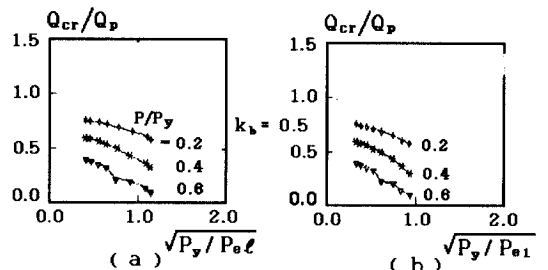


그림 6. 해석모델(1) box형

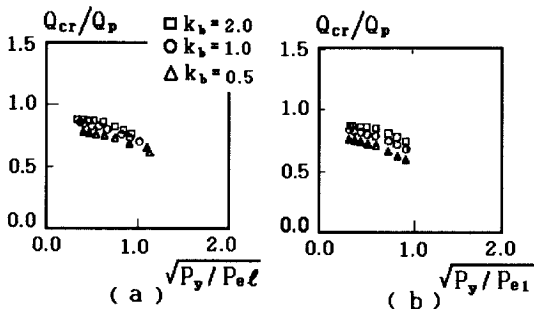


그림 5. 해석모델(1) box형

그림 5, 그림 6은 보는 H형, 기둥은 box형단면인 경우(표 2 참조)의 결과이다. 수평내력은 거의 직선으로 저하하고, 기둥단면이 H형강인 경우와 비교해서 다소 내력저하가 큰 정도로서 큰 차이는 없다.

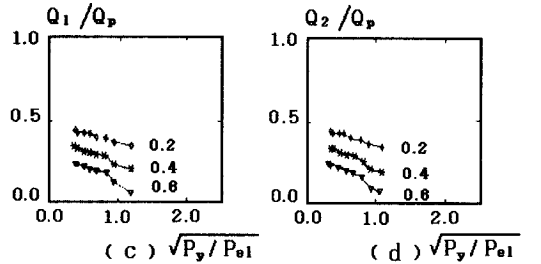
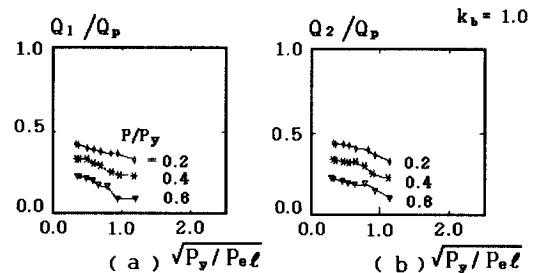


그림 7. 굴조기둥의 전단력(해석모델(1)) H형

그림 7은 해석모델(1)의 좌우기둥의 전단력을 각각 도시한 것으로서, 축력이 큰 경우의 우측기둥의 전단력 Q_2 의 저하는 다소 크지만 좌우기둥의 전단력차이는 아주 작다.

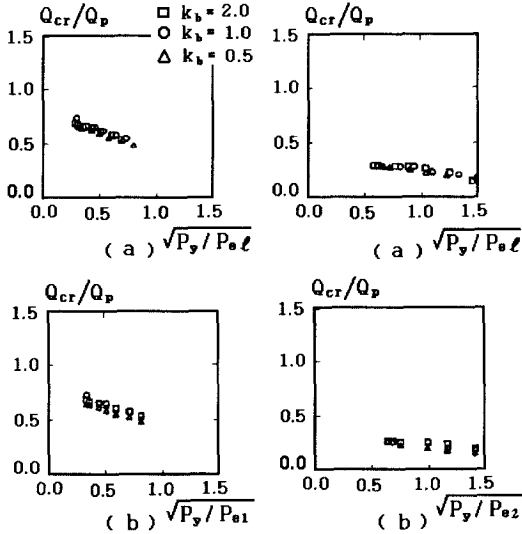


그림 8. 해석모델(3) H형 그림 9. 해석모델(4) H형

그림 8, 그림 9는 $P/Py=0.2$ 일때, 해석모델(3), (4)의 결과로서 기둥의 한쪽강성이 다른 기둥의 1/2인 경우를 상정했다. 주각이 고정인 경우인 그림 8은, 양기둥의 강성이 같은 경우의 결과(그림 2)에 비교해서 평균적으로 약 15%정도 저하하고 있지만, 주각이 핀인 그림 9는, 그림 3과 비교하면, 약 50%정도 저하해서, 기둥1개의 강성을 약하게 하면 내력의 저하가 지나쳐서 수평내력을 기대할 수 없게 된다.

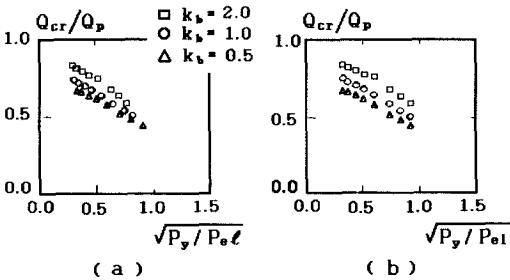


그림 10. 해석모델(3) box형

그림 10은 $P/Py=0.2$ 일 때, 해석모델(3)의 box형 기둥단면인 경우의 결과이고, H형단면의 경우(그림 8)의 결과보다 다소 크지만, 그 경향은 거의 같다.

3층 2스팬 골조

1차 진동모드상태의 각 층의 관성력은 역3각형으로 되는 점⁷⁾을 고려해서, 수평력의 분포를 3:2:1의 3각형 분포로 가정했다.

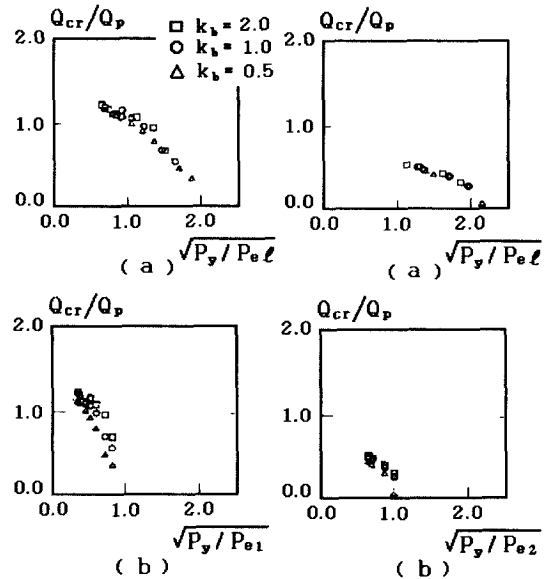


그림 11. 해석모델(6) H형 그림 12. 해석모델(7) H형

그림 11은 주각고정, 그림12는 주각 핀인 경우의 3층골조의 해석결과로서, 각층의 기둥에는 $0.2P_y$ 의 축력이 가해진 경우의 최대수평내력과 세장비의 관계이지만, Euler좌굴하중을 이용한 그림 11(b)은 골조전체의 좌굴하중을 이용한 그림 11(a)와 크게 다르며, 실제의 세장비는 이보다 상당히 크다. 또, 1층 골조의 결과인 그림 2, 그림 3과 비교하면, 세장비의 증대에 따른 수평내력의 저하가 급하고 최대수평내력에 미치는 세장비의 영향이 크고, 그 경향은 기둥이 box단면인 그림 13에서도 비슷하다.

이것은 골조전체의 탄성좌굴하중 P_{e1} 을 이용하여 골조의 수평내력을 평가할 필요가 있음을 의미한다.

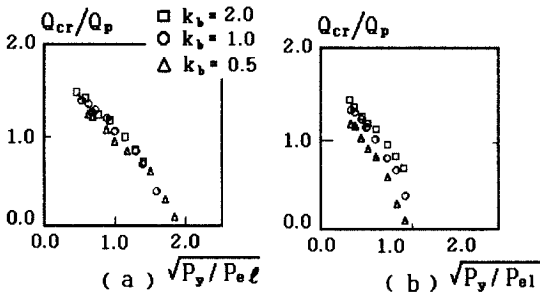


그림 13. 해석모델(6) box형

3.2 보의 내력이 기둥보다 약한 경우의 수평내력

1층 1스팬 골조

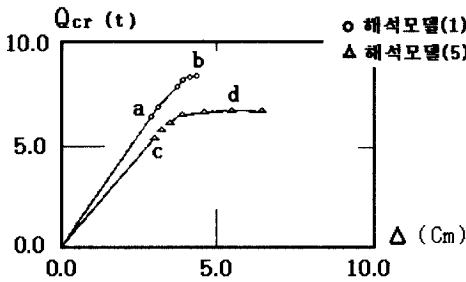
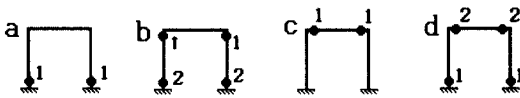


그림 14. 수평내력-수평변위의 관계($P/P_y=0.2$) H형

여기서는, 보의 내력이 기둥에 비해서 극단으로 약한 경우의 최대수평내력에 대해서 검토한다.

그림 14는 수평내력 Q_{cr} 과 수평변위 Δ 의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 해석모델(1)은 보의 강비 $k_b=1.0$ 의 값을 이용했고, 해석모델(5)는 보의 강비를 $k_b=0.5$ 로 하고 보의 항복모멘트는 기둥의 1/2로 했다. 그림의 상단부에 a, b, c,

d는 각각의 하중점에서의 응력상태를 나타낸다. 또 그림 중의 '1'은 탄소성응력상태, '2'는 변형경화 영역의 응력상태를 나타내고, 아무런 번호가 붙지 않은 재단(材端)은 탄성응력상태를 나타낸다.

해석모델(1)의 경우는, 기둥하단의 응력상태가 '1'에서 '2'로 이행(移行)할때까지는 수평내력이 상승한다. 해석모델(5)의 경우는, 우선 보에 소성이 발생하고 기둥의 양쪽주각이 응력상태 '2'가 될 때까지 내력이 서서히 상승한다. 각각의 최대내력의 차이는 약 20%로서 상당히 크다. 또, 해석모델(1)의 경우는, 최초의 항복(a점)에서 최대수평내력(b점)까지의 내력증분은 전체내력의 약 23%인데 비해서, 보가 기둥강도의 1/2인 경우는 전체의 약 19%이고, 그 차이는 약 4%로 그다지 크지는 않았다.

여기서 알 수 있는 것은, 보의 강비가 극단으로 약하면 최대내력의 감소는 눈에 띄게 크지만 최초의 항복에서 최대내력까지의 내력상승분은 보가 강한 경우와 비교해서 차이가 그다지 없다.

3층 2스팬 골조

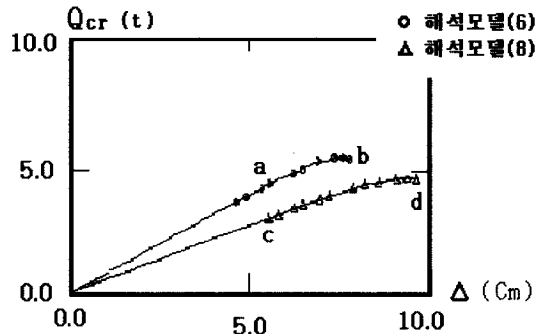
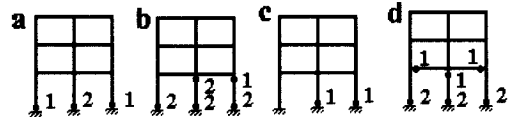


그림 15. 수평내력-수평변위의 관계($P/P_y=0.2$) H형

그림 15는 3층골조의 경우로써, 해석모델(8)은 해석모델(5)와 같이 보의 강비를 $k_b=0.5$, 보의

항복모멘트를 기둥의 1/2로 했다. 해석모델(6)과 해석모델(8)의 최대수평내력의 차이는 약 10%로서 1층의 경우와 비교해서 약 1/2이 된다. 해석모델(6)의 경우, 최초의 항복에서 최대수평내력까지의 내력상승은 전체의 약 29%이고, 보가 약한 경우인 해석모델(8)의 경우는 약 30%로서 거의 같다.

따라서 보가 기둥강도의 1/2인 경우는, 3층골조가 1층골조보다 수평내력의 저하가 적으며, 최초의 항복에서 최대수평내력까지의 내력상승률은 보가 기둥강도와 같은 경우와 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 보가 기둥보다 약한 골조의 경우는, 수평내력의 저하가 크고, 기둥의 좌굴길이가 골조의 수평내력에 미치는 영향이 크므로, 본 연구에서와 같은 수평내력 해석기법을 이용하거나 골조전체의 탄소성좌굴로부터 정의되는 k-factor도표, 예를 들면, 문헌⁽⁵⁾의 결과를 이용해서 구해지는 세장비를 이용할 수도 있다.

3.3 골조 기둥부재의 축력비와 세장비의 제한

여기서는, 골조 기둥부재에 소요되는 수평내력에 필요한 축력비와 세장비의 제한에 대해서 검토한다. 골조 기둥부재의 설계시에는, 탄소성좌굴하중에 도달할때까지 골조가 안정성을 잃지 않기 위한 기둥부재의 축력비 및 세장비의 제한을 둘 필요가 있다. 소성치침⁽¹⁰⁾에서는 $k_b = 0.5, 1.0, 2.0$ 에 대해서 다음 식의 제한을 두고 있다.

$$P/P_y \leq 0.25 \frac{\pi^2}{\lambda_x^2} \left(\frac{E}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

단, $\lambda_x (= kh/i, k : k\text{-factor})$: 기둥의 세장비,

σ_y : 항복응력, P_y : 기둥의 항복축력

그런데 이 제한식은 수평력의 영향을 고려하지 않고, 골조의 탄소성좌굴하중을 근거로 제안된 식이

다. 따라서, 본 연구에서는, 수평력과 축력이 가해진 골조의 다양한 해석모델들을 대상으로 구한 여러 해석결과를 참조하여, 골조의 기둥설계시에 적용될수 있는 축력비 및 세장비의 제한치에 대해서 검토하고자 한다.

골조기둥의 소요수평내력에 대해서, 축력비와 세장비의 제한식을 구하기 위해서는, 실험치로부터 평가한 $P-\Delta$ 효과를 고려한 설계식⁽¹¹⁾

$$\frac{P}{P_{cr}} + 0.85 \frac{M + P\Delta/2}{M_p} \leq 1.0 \quad (3)$$

와 변형능력의 평가식⁽¹²⁾ 를 이용하기로 한다.

$$\frac{\Delta_{pr}}{\Delta_y} = \frac{0.26}{(P/P_y)\lambda^2} \quad (4)$$

그리고, 기둥의 중심축압축력(P_{cr})은 LRFD규준⁽¹³⁾의 다음 식을 이용하기로 한다.

$$P_{cr} = (1 - 0.5 \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_e - \lambda_p}) P_y \quad (5)$$

단, $M_{pc} = 1.18(1 - P/P_y)M_p$

M : 1차휨모멘트

$$\Delta_y = \frac{M_{pc}}{6EI/h^2} \quad (\text{항복수평변위}),$$

Δ_{pr} : 수평변위 추정치

Δ : M_{max} 때의 수평변위

$$\lambda = \frac{\lambda_x}{\pi/\sqrt{\epsilon_y}} \quad (\equiv \sqrt{P_y/P_e})$$

(λ_x : 기둥의 강축 세장비)

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(kh)^2} \quad \text{: 탄소성좌굴내력}$$

λ_p (소성한계세장비) = 0.15,

λ_e (탄성한계세장비) = 1.29

를 이용하기로 한다. 그리고 기둥 상하단의 휨모멘트 M 이 같다고 가정하면, 기둥의 소요수평내력은

$$Q_{br} = 2M/h \quad (6)$$

이 성립하므로, $\lambda, P/P_y, M_p, \Delta_y$ 가 정해지면, 식(3)으로부터 수평내력이 구해진다.

이렇게 가정해서 얻어진 기둥(해석모델(6)의 2층 중간기둥, AB기둥)의 전단력 추정치 Q_{br} 과 해석에서 얻어진 최대내력점에서의 전단력 Q_2 를 비교하면, 표 3과 같다.

표 3. 전단력의 추정치와 해석치의 비교 (Q_{br}/Q_2)

| k_b | $\lambda_x(\lambda)$ | | | |
|-------|----------------------|------------|------------|-------------|
| | 30.1(0.32) | 40.6(0.44) | 54.8(0.59) | 66.16(0.71) |
| 0.5 | 1.104 | 1.132 | 1.143 | 1.140 |
| 1.0 | 1.040 | 1.098 | 1.062 | 1.053 |
| 2.0 | 1.072 | 1.098 | 1.062 | 1.053 |

여기서, Q_{br}/Q_2 의 값은 평균 1.089이고 거의 10%내에 있다. 다소 위험측 설계가 되지만 거의 만족할수 있는 결과를 나타내고 있다.

따라서, 골조 기둥부재의 소요수평내력 Q_{br} 에 대한 축력비와 세장비의 제한치는 근사적으로 다음의 절차를 통해 추정할 수 있다.

단계1: 소요수평내력 Q_{br} , 전소성모멘트 M_p , 축력비 P/P_y 를 정한다.

단계2: 단면2차모멘트 I 를 가정하고, Δ_y 를 계산한다.

단계3: 실험치에서 평가된 내력식(3)과 변형능력의 추정치 식(4)로부터, 다음의 3차방정식을 풀고, 세장비 (λ_o)를 구할 수 있다.

$$a\lambda^2 + b\lambda + c\lambda + d = 0 \quad (8)$$

$$\text{단, } a = \left[0.5 - 0.2125 \frac{Q_{br} \cdot h}{M_p} \right] \frac{1}{\lambda_e - \lambda_p}$$

$$b = \frac{P}{P_y} + 0.425 \frac{Q_{br} h}{M_p} + (0.2125 \frac{Q_{br} h}{M_p} - 0.5) \frac{\lambda_p}{\lambda_e - \lambda_p} - 1$$

$$c = -0.055 \frac{\Delta_y P_y}{M_p} \cdot \frac{1}{\lambda_e - \lambda_p}$$

$$d = 0.110 \frac{\Delta_y P_y}{M_p} + 0.055 \frac{\Delta_y P_y}{M_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_e - \lambda_p}$$

단계4: 구해진 세장비 (λ_o)로 부터, 다음 식

$$\lambda_o = \frac{1}{\pi/\sqrt{\epsilon_y}} \cdot \frac{kh}{\sqrt{I/A}} \quad (7)$$

을 이용해서 단면2차모멘트 I 를 계산하고, 단계2에서 가정한 I 와의 일치여부를 검토한다. 만일, 일치하지 않으면 단계2로 되돌아가고, 일치하면, 그때의 λ_o 값이 제한치가 된다.

이제까지 본 연구에서 검토된 것을 정리하면, 다음과 같다. 먼저, 골조의 수평내력은 보의 강비 k_b 가 클수록, 세장비가 클수록 수평내력을 다소 작게 평가하며, 축력비의 증가에 따른 수평내력의 저하는 거의 직선적으로 감소하고, 기둥단면이 box형인 경우가 H형보다 다소 크지만, 그 차이는 크지 않다. 또, 보가 기둥강도의 1/2인 경우는, 3층골조의 경우가 1층골조보다 수평내력의 저하는 적고, 최초의 항복에서 최대수평내력까지의 내력상승률은, 보의 강도가 기둥강도와 같은 경우와 차이가 거의 없다. 따라서, 기둥1개의 Euler좌굴하중 (P_{e1}, P_{e2})에 의해서는 골조의 수평내력 (Q_{cr})을 합리적으로 평가하지 못하며, 골조전체의 좌굴하중 (P_{e1})에 의

한 올바른 평가가 필요하다. 그리고 실용설계시, 골조의 소요 수평내력에 대한 골조기둥의 제한치를 추정하는 절차를 제안했으며, 이 절차를 응용하면, 골조전체의 수평내력을 추정할 수 있다.

이상에서와 같이, 골조의 불안정문제는 기둥 1개의 좌굴문제로 취급하는 것보다, 골조전체의 불안정문제로 취급해야 하며, 본 연구에서의 해석기법을 사용하면, 횡이동이 동반된 비가새 강골조의 탄소성거동 추적에도 실용상 충분하다고 사료된다.

한편, LRFD규준(안)³⁾에서는 P- Δ 효과를 고려한 2차해석대신에 모멘트증폭계수(amplification factor)를 이용해서 내력을 평가하고 있으나, 이에 대해서는 추후의 연구과제로 하기로 한다.

4. 결 론

횡이동(Sidesway)를 동반하는 강골조를 대상으로 하여, 본 연구에서는 P- Δ 효과를 고려한 강골조의 탄소성해석기법을 이용해서, 다양한 해석모델을 상정한 광범한 수치해석을 실시하였고, 골조의 탄소성거동과 최대수평내력을 대상으로 한 경우의 기둥부재의 축력비 및 세장비의 제한에 관하여 검토하였다.

요약하면, 다음과 같다.

- 1) 골조의 안정문제는 기둥1개의 좌굴문제로 취급하는 것 보다는, 골조전체의 불안정문제로 취급하여 평가해야 한다. 따라서, 골조의 최대수평내력은 Euler좌굴하중보다는 골조전체의 좌굴하중에 대한 합리적인 평가에 의해서 가능하다.
- 2) 골조의 소요수평내력에 대한 기둥부재의 축력비 및 세장비 제한치를 구하는 순서를 제안한다.

감사의 말

본 연구는 1998년도 교내 학술연구조성비의 일부지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) 「강구조설계기준」, 대한건축학회, 1985
- (2) 「강구조설계기준」, 일본건축학회, 1980
- (3) 「강구조 한계상태설계규준(안) 및 해설」, 대한건축학회, 1993
- (4) Jong-Sung KIM, "Elasto-plastic analysis of steel beam-columns subjected to side-sway", Proc.of EASEC-4, Seoul, Korea, Sep.20-22, pp.825-830,1993
- (5) 김종성, "강골조의 탄소성좌굴하중 평가에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 12권2호, pp.183-197, 1996.2
- (6) 金鍾聲, "鋼骨組의 탄소성해석을 위한 等價剛性係數의 評價에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 7권 4호, pp.159-169, 1991.8
- (7) Y.Hangai, *Numerical analysis in the vicinity of critical points by the generalized inverse*, Bullitin of IASS, No.95, Madrid, Spain, Nov.1987
- (8) 高梨, 孟, "低YR 高張力鋼의 耐力과 變形性能", 日本建築學會 梗概集(九州),1989.10
- (9) Jong-Sung KIM, "Lateral-load evaluation of steel frames subjected to sidesway", Proc.of PSSC98,Seoul,Korea, pp.229-233, Oct.13-16,1998
- (10) 「강구조소성설계지침」, 일본건축학회, 1985
- (11) 金鍾聲, "Sidesway를 동반하는 Beam-Column의 내력평가에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회 논문집, 4권 2호, 1992.6
- (12) 金鍾聲, "Sidesway를 동반하는 Steel Beam-Column의 소성변형능력의 평가방법에 관한 연구", 대한건축학회 대구경북지부 논문집, 2권 1호, 1992.12
- (13) 「강구조 한계상태 설계지침·동해설」, 일본건축학회, 1998.9

(접수일자 : 1998년 12월 16일)