

# 철골 건축구조물의 내진설계를 위한 소성 전단 힌지

## Plastic Shear Hinges for the Seismic Design for Steel Building Structures

이 승 준\*

### I. 서언

최근까지 우리나라에서 발생한 역사지진과 계기 지진의 분석결과 건축물에 상당한 영향을 줄 수 있는 지진이 앞으로 발생할 가능성이 있는것으로 밝혀짐에 따라 1988년 건설부에 의해 내진설계 기준이 제정되었다(1).

내진설계 기준에서 요구되는 하중의 근간이 되는 지반의 진동 강도는 일반적으로 다음의 두 요소에 의해 나타낼 수 있다. 즉 근거리 지진을 위한 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration)와 원거리 지진을 위한 유효최대속도(Effective Peak Velocity)이다. 유효최대가속도와 유효최대속도는 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration)와 최대지반속도(Peak Ground Velocity)에 관련이 있지만 같거나 비례관계에 있지는 않다. 미국의 ATC3-06 (2)에서는 예상지진에 의한 유효최대가속도와 유효 최대속도에 따라 지진구역을 설정하였고 UBC (3)는 예상최대지진을 기준으로 미국의 전지역을 5개의 구역으로 나누어 각 구역의 지진강도를 정하고 있다. 우리나라의 내진설계기준은 전지역을 3개의 구역으로 각 지진강도를 나타내고 있다. 한 구역에 나타난 지진강도는 50년동안에 발생할 확률이 10%를 초과하는 지진에 근거하고 있다. UBC 나 한국 내진설계 기준이든 내진설계 기준의 적용은 건축물의 설계시 비록 그 정도가 작더라도 지진

에 대한 위험도를 고려하여야 한다.

내진을 위한 건축물의 횡하중 지지 구조 시스템은 적당한 강성과 강도, 그리고 연성(Ductility)을 갖도록 설계되어야 한다. 적당한 강성과 강도는 약한 지진이나 중간규모의 지진이 일어날 때 피해를 주로 비구조적 부재에 국한시키기 위하여 구조물의 층간변위를 일정한 범위내로 제한하는데 필요하며, 최대 허용 층간변위는 구조물에서 중요한 구조부재의 허용변형능력에 따라 결정된다.

연성은 강한 지진이 발생할 때 구조물에 요구되는 성질이다. 강한 지진은 건축물의 수명내에 한번 또는 두번 발생할지 모른다. 따라서 강한 지진에 건축물이 붕괴되지 않고 인명의 피해를 피할 수 있다면 건축물이 탄성범위내에서 거동하도록 설계하는 것은 경제적으로 타당하지 않다. 이러한 건축물은 일부 부재에서 탄성범위를 넘는 응력을 받도록 설계되는데, 적당한 연성은 구조부재와 접합부 뿐만 아니라 전체 구조시스템에 필요한 요구조건이 된다. 이것은 강한 지진을 흡수하면서 붕괴가 일어나지 않도록 강도의 저하없이 큰 횡변위에 견디게 구조물을 설계하는 것을 의미하며, 이러한 구조물의 안정성은 비탄성범위에서의 구조물의 연성적 거동에 크게 의존하게 된다.

### II. 내진설계에서 연성의 필요성

지진에 의해 건축물에 발생하게 되는 횡력의

\* 정회원, 아주대학교 건축학과 조교수, 공박

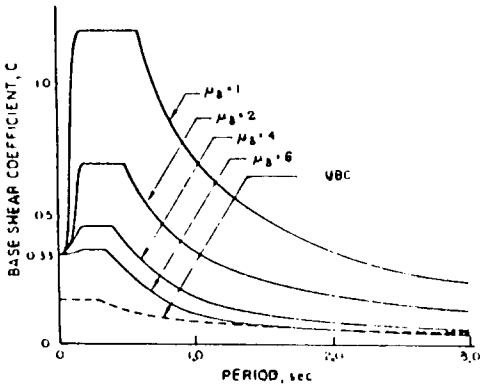


그림1. 밀면 전단력 계수 곡선

크기는 구조물의 진동주기와 크게 관계를 갖는다. 진동주기가 작은, 즉 상대적 강성이 큰 구조물은 상대적으로 큰 횡력을 받게되고 그 반대로 성립된다. 한 구조물에 작용하는 이러한 횡력의 합은 밀면 전단력(Bese Shear)에 의해 나타낸다. 한 구조물의 주기와 밀면 전단력 계수, C와의 변화관계가 그림1에 있다. 1차 자유도를 갖는 구조시스템의 강한 지진에 대한 동적해석으로 부터 얻어진 결과를 실선에 의해 나타냈으며,  $\mu=1$ 로 되어 있는 최상부 실선은 지진시 구조물이 탄성범위내에서 거동하도록 설계할 때 필요한 작용하중의 크기를 나타낸다. 반면에 하부에 있는 점선은 UBC에 의한 설계하중의 크기를 보여주고 있다. 두 경우의 횡력의 크기는 크게 다를 수 있다. 그러나 구조물이 강도의 저하없이 연성적으로 거동하도록 된다면 설계하중의 크기는 상당히 줄어들 수 있다. 그림1.에서 볼 수 있듯이 구조물이 안전하게 횡적으로 비탄성 변위를 일으킬 수 있다면, 예를 들어 초기 항복시의 횡변위의 크기의 두배로 변위가 일어난다면  $\mu=2$ 에 의한 횡하중에 의해 설계될 수 있다.  $\mu=4$  또는  $\mu=6$ 의 횡변위 연성을 갖는 골조인 경우 설계하중은 더욱 줄어들게 된다.

위와 같은 이유때문에 구조물은 설계규준에 의한 하중에 대해 탄성적으로 설계될 수 있다. 다만, 그것에 충분한 연성이 골조에 있어야 한다. 그러나 이러한 일반적인 내진설계 방법이 완전한 것은 아니다. 구조물의 설계시 탄성적인 방법을 이용하

면 설계자는 소성항복이 어느곳에 일어나는지 모르며 그 정도 또한 인식하지 못하고 있다. 구조물 전체의 연성은 일반적으로 개개의 부재나 접합부에 요구된 연성보다 훨씬 작다. 따라서 지진시 구조물에 생길 수 있는 비탄성 영역과 그 크기에 대한 이해가 필요하다. 이제까지 실용적으로 사용되는 철골조의 비탄성 해석은 소성항복이 부재내 특히 부재의 양단에 소성 모멘트 힌지의 형태로 생기는 것으로 인식되어 왔으며, 이러한 소성 모멘트 힌지는 축방항력이 존재하면 그 능력이 저하된다. 그러나 소성힌지가 전단력때문에 생기는 경우가 있다. 보-기둥의 접합부에 있는 Panel Zone과 편심 가새골조의 Link Beam이 대표적인 예가 될 수 있다.

### III. Panel Zone

가장 경제적인 비용으로 강성과 강도등의 건축구조물에 요구되는 조건을 만족하는 건축물을 설계할 필요성에 의해 여러형태의 구조시스템이 발전되어 왔다. 일반적으로 건축구조시스템은 건축물의 높이에 따라 분류된다. 비교적 낮은 고층 건축물은 모멘트골조나 가새골조가 적절하며 건축물의 평면계획을 고려하여 모멘트골조가 가새골조에 비하여 선호되어 왔다. 이 골조는 부재상호간의 강도를 차이나게 설계하고 적절한 상세를 택함으로써 연성과 Strong Column-Weak Beam의 내진설계 요구조건이 쉽게 충족될 수 있다. 그러나 보-기둥의 접합부의 보강되지 않은 Panel Zone이 전단력에 의해 탄성범위를 넘는 응력이 생기는 경우가 있음을 알아야 한다.

고층 건축물의 내진설계시 보 단면의 설계는 종종 설계규준에 따른 횡력에 의한 휨 모멘트에 의해 결정되지 않는다. 그것은 층간변위의 제한을 만족시키기 위해 보의 단면이 내진설계하중에 의하여 필요한 단면보다 크게 설계되어야 하기 때문이다. 이때 위와 같이 강도가 크게 설계된 보의 소성 모멘트가 기둥에 전달될 수 있도록 보-기둥 접합부의 Panel Zone을 보강하는 것은 비용이 매우 많이 들게 되며 UBC 내진설계규준에서도 이러한 Panel Zone을 포함하여 보-기둥의 접합부를 보의 소성모멘트에 상응한 강도를 갖도록 설계해야 함을

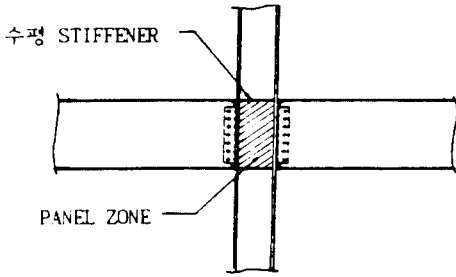


그림2. 보-기둥 접합부

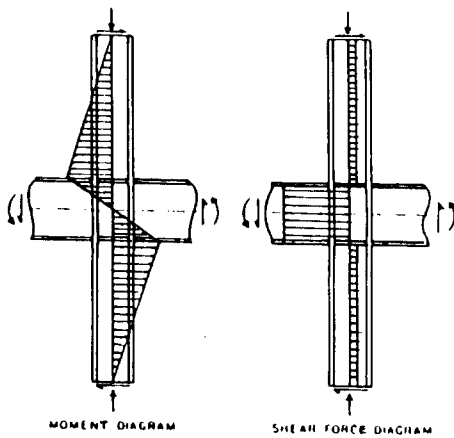


그림3. 접합부의 휨모멘트와 전단력

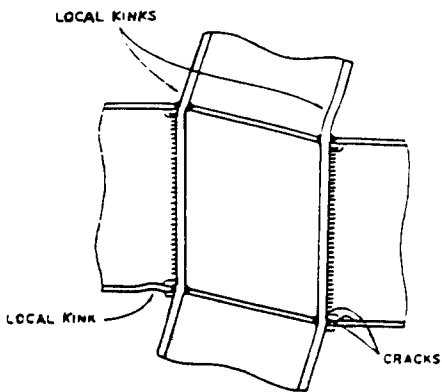


그림4. PANEL ZONE의 전단변형

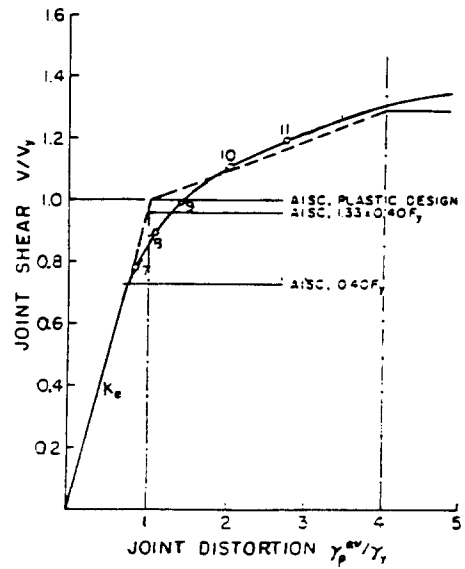


그림5. 접합부의 전단력-변형 곡선

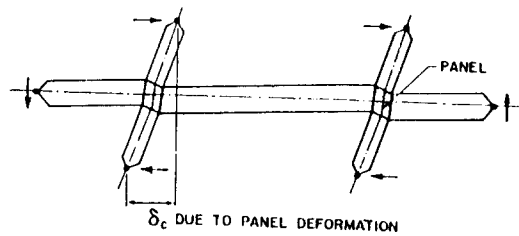


그림6. PANEL ZONE의 전단변형에 의한 층간변위

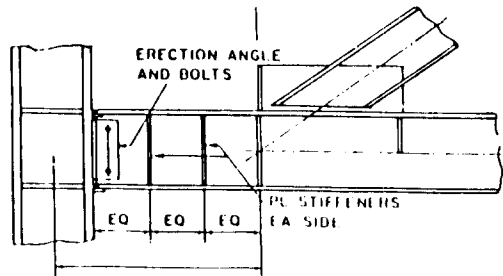


그림7. LINK BEAM의 상세

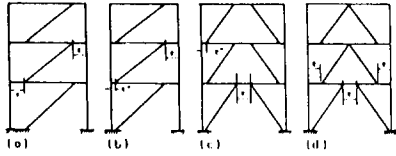


그림8. 편심가새골조의 형태

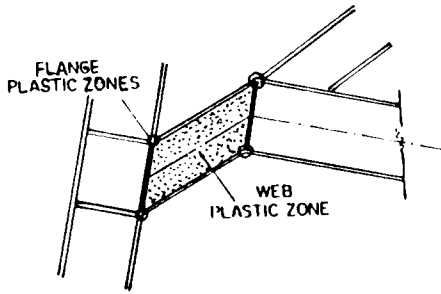


그림9. LINK BEAM의 소성 전단 힌지

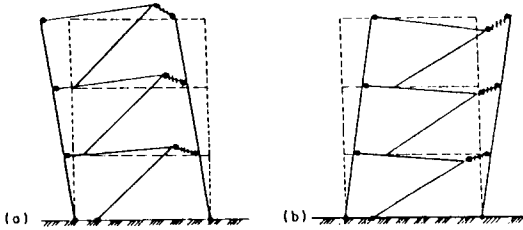


그림10. 편심가새골조의 붕괴 MECHANISM

요구하지 않고 있다. 다만 접합부가 적절한 연성을 갖도록 설계 되어야 함을 요구하고 있다. 따라서 실제 지진이 발생할 때 이러한 Panel Zone은 보에 앞서서 비탄성 변형을 일으키게 되고 건축구조물의 안정성에 영향을 주게 되므로 Panel Zone의 거동에 대한 이해가 필요하게 된다. 그림2.는 모멘트 골조에서 보-기둥 접합부의 Panel Zone을 보여주고 있다. 그림3.은 횡하중이 작용할 때 Panel Zone에 작용하는 휨 모멘트, 전단력을 보여주고 있는데, Panel Zone에 매우 큰 전단력이 생기는 것을 볼 수 있고 따라서 큰 전단변형을 일으키게 되며 이 변형에 의해 소성전단 힌지가 생기게 된다. 그림 4.는 이러한 소성 힌지의 변형을 과장해서 크게 그린것이다.

실험결과에 의하면 전단력에 의한 Panel Zone의 Hysteresis 거동은 항복점 이후에도 안정성이

유지됨을 알 수 있는데 그림5.는 Panel Zone의 전단력-전단변형( $V-\gamma_p$ )관계를 3-영역으로 구분하여 보여주고 있다. 전단 항복 변형( $\gamma_y$ )까지의 초기의 탄성영역과  $\gamma_y$ 와  $4\gamma_y$  사이의 영역, 그리고 그 이후의 영역으로 나누어 질 수 있는데 마지막 영역은 강성이 별로 크지않은 전단에 대한 재료의 변형경화에 의한 영역이다. 탄성영역과 변형경화 영역 사이의 중간영역은 Panel Zone의 부분적인 변형경화와 Panel Zone의 주위에 있는 부분들, 즉 기둥 플랜지, 수평 stiffener, 보의 웨브등의 강성에 의한 영역이다. 이 소성 전단 힌지는 골조에 추가적인 자유도를 주게되며 따라서 이에 따른 층간변위를 일으키게 된다. 그림6.은 Panel Zone의 전단변형에 의한 층간변위의 크기를 보여주고 있다. 대략적으로 Panel Zone의 변형,  $\gamma_p$ 는 층간변위 Index( $\delta_{cjh}$ )와 일치한다. 이러한 추가적인 변위는 구조물의  $p-\Delta$ Effect를 상당히 증가시킬 수 있다.

#### IV. Link Beam

앞에서 기술한 바와 같이 내진설계에 의한 건축물은 구조물의 안정성이 지진동안이나 지진후에 유지되어야 하는것이 필수적이다. 따라서 내진설계시 구조물의 전체 안전성에 크게 영향을 주는 부재에 특히 주의를 기해야 한다. 만일 비탄성 변형이 구조물의 일부 부재에 일어나도록 설계되었고 또 예상된다면, 비탄성 변형이 주요한 구조부재보다는 2차적인 부재에 일어나도록 구조물의 부재를 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 개념과 전단력에 의해 비탄성변형이 일어나는 부재는 Hysteresis 거동이 매우 안전성이 좋다는 결과를 이용하여 가새골조가 발전된 것이 편심가새골조이다. 실험결과에 의하면 채래식 골조는 반복하중에 의해 가새재의 좌굴이 일어나고 따라서 pinching과 deteriorating 을 갖는 hysteresis 거동을 나타내며 그 결과 에너지를 흡수하고 소산하는 능력이 작아 연성이 작게된다. 때문에 UBC 내진설계규준은 편심가새골조에 비해 설계횡하중를 20% 크게 요구하고 있다.

그림7.은 편심가새골조의 Link Beam의 한 상세를 보여주고 있다. Link Beam은 기둥과 가새재사

이에 있는 보의 작은 부분이며 이러한 Link Beam 이 있는 편심가새골조의 형태는 다양하다(그림 8.). Link Beam의 길이가  $e$ 가 길면 횡력에 의해 Link Beam의 양단에 모멘트 힌지가 생기게 되며 길이가  $e$ 가 짧으면 Link Beam의 웨브에 전단력에 의해 소성 전단 힌지가 생기게 된다. 따라서 Link Beam이 전단력에 의한 항복이 일어나도록 하기 위해 다음식에 의해 그 길이를 결정하도록 요구하고 있다.

$$e = \frac{2.0 M_p}{V_p}$$

여기에서  $M_p$ 는 Link Beam의 소성 모멘트,  $V_p$ 는 전단 강도,  $\tau_v, t_w$   $h$ 이며  $\tau_v$ 는 재료의 전단 항복응력,  $t_w$ 는 보웨브의 두께,  $h$ 는 보단면의 높이이다. Link Beam에 축방향력이 있는 경우 웨브의 전단 강도는 Yield Criterion에 의해 감소된다. 이때 가새재는 좌굴이 일어나지 않도록 Link Beam에 비해 강도가 상대적으로 크게 설계되어야 한다.

그림9.은 구조물에 작용하는 횡력에 의해 생기는 전단력에 의한 Link Beam의 소성 전단 힌지를 과장해서 나타내고 있으며 그림10.은 Link Beam의 소성 전단 힌지에 의한 편심가새골조의 붕괴 Mechanism이다. 이러한 붕괴 Mechanism은 구조물

의 안정성을 유지시켜 주며 또한 지진 에너지를 크게 흡수, 소산시킬 수 있다.

## V. 결론

고층 건축구조물의 내진설계에서는 강성, 강도와 연성사이의 균형이 적절하게 유지되어야 한다. 이 글은 철골 고층건축물의 대표적인 구조시스템인 모멘트 골조와 가새골조의 내진거동에 대한 이해를 넓히고자 최근 연구되어온 Panel Zone과 Link Beam의 거동에 대한 결과와 설계시 유의사항을 간략하게 소개하였다. 미흡하나마 회원들에게 도움이 되었으면 하며, 이 분야에 대한 연구와 이에 관련된 개념의 새로운 구조시스템에의 적용은 앞으로 수행되어야 할 과제라 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. 내진구조설계 기준, 건설부, 1988.
2. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of seismic Regulations for Buildings, ATC3-06, 1978.
3. ICBO Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, 1988.