

knee brace가 설치된 구조물의 내진설계 Seismic Design of Structures with Knee Braces

김진구* 서영일**
Kim, Jinkoo Seo, Youngill

ABSTRACT

In this study a analytical model for a structure with buckling-restrained unbonded knee-braces is proposed, and a performance-based seismic design procedure for such a system is provided. The proposed structure system has advantage of simplifying the structural design procedure in that the hinge-connected main structural members, such as beams and columns, are designed only for gravity loads, and all the lateral seismic load is resisted by the braces. The design procedure is based on the concept of equivalent damping, and is implemented to the capacity spectrum method. Parametric study is performed with design variables such as yield stress and cross-sectional area of knee-braces to find out proper slope of the braces.

1. 서론

내진설계 기준에 따라 설계된 구조물이라 할지라도 설계지진하중 크기 이상의 지진이 발생할 경우 구조부재에 크고 작은 손상이 발생하는 것을 피할 수 없다. 지진에 의하여 철골 모멘트골조에 구조적 손상이 발생하는 현상은 보-기둥 접합부를 힌지(hinge)로 처리하여 중력하중만 부담하도록 하고, 지진하중과 같은 횡력은 가새가 모두 부담하도록 설계함으로써 해결할 수 있다. 이러한 경우 기둥과 보와 같은 주요 구조부재는 구조물이 큰 지진하중을 받는 경우에도 탄성적으로 거동하고, 소성 변형에 의한 에너지 소산 및 손상은 가새에 집중하게 되며, 손상된 가새는 최소한의 비용으로 교체할 수 있다.

최근 개발된 비좌굴가새 (Buckling Restrained Brace) 또는 비부착가새(Unbonded Brace)는 철골가새를 철골 튜브 속에 배치하고 콘크리트 등으로 충전함으로써 압축시 좌굴을 방지할 수 있다. 따라서 압축력을 받을 경우에도 인장력을 받을 때와 같이 안정된 이력거동을 통하여 진동에너지

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수

** 학생희원 · 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

를 소산시킨다.”

본 연구에서는 지진에 의한 진동에너지를 좌굴이 방지된 knee brace의 비탄성 이력거동을 통하여 소산시킴으로써 기둥과 보의 손상을 방지할 수 있는 구조시스템의 역학적 모델링 및 성능에 기초한 내진설계 절차를 제시하였다. 한지로 연결된 knee-brace 골조 시스템의 초기설계를 위하여 먼저 보-기둥 골조를 중력하중에 대하여 설계하고, 횡력을 부담하는 knee brace는 현행 내진설계 기준의 등가정적해석법²⁾으로 구한 지진하중에 대하여 설계를 수행하였다. 다음 단계로 설계된 구조시스템의 내진성능을 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)을 이용하여 평가하고, 주어진 성능수준을 만족하도록 knee brace를 재설계하도록 하였다.

2. 비좌굴 knee brace 가 설치된 구조물의 모델링

2.1 knee brace의 설치 형태

knee brace는 보의 상하부에 설치할 수 있다. 그림 1은 비좌굴 knee brace가 보의 위와 아래 양쪽에 설치된 골조 구조물과 접합부 상세를 나타낸다. 하부 knee brace는 천장마감에 의해 가려지며, 상부 knee brace는 외부 골조의 경우 커튼 월로 가려지고, 내부 골조의 경우 간막이벽으로 가려질 수 있는 곳에 설치한다면 기능이나 외관을 해치지 않는다.

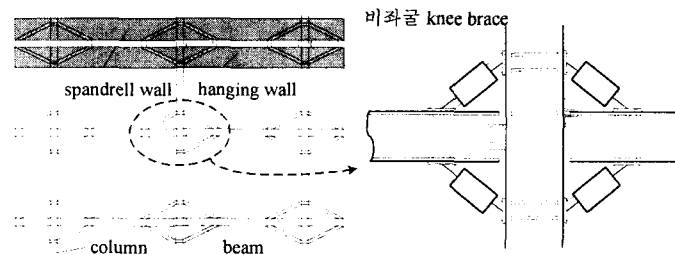


그림 1. knee brace가 설치된 골조

2.2 knee brace가 설치된 구조물의 역학적 모델링

본 연구에서는 knee brace가 보의 하부에만 설치된 경우에 대하여 힘-변위 관계식을 유도하였다. 단위 보-기둥-가새 시스템을 이용하여 설치된 knee brace의 힘과 변위 관계를 구할 수 있다. 보와 기둥은 가새에 비하여 매우 큰 단면을 가지고 있으므로 강체 (rigid body)로 거동한다고 가정하였고, knee brace는 항복 후 강성이 없는 이선형(elastic-perfectly plastic) 거동을 한다고 가정하였다. 보-기둥 접합부는 한지로 연결되어 있으므로 횡하중은 일차적으로 knee brace가 부담하게 된다. 기둥과 보의 knee brace에 비하여 강성이 크므로 탄성범위에서 거동하고, 보가 항복모멘트에 도달하기 전에 knee brace가 항복하게 되어 본 연구에서 제시하는 설계 개념에 부합하게 된다. 그림 2(a)에 나타난 해석모델의 탄성영역에서의 시스템 강성(K_{SE})과 knee brace가 항복할 때의 극한강도 (Q_y)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{SE} = \frac{Q}{\delta} = \frac{K_d(A+B)^2}{L^2} \quad (1)$$

$$Q_y = \frac{N_y(A+B)}{L} \quad (2)$$

여기서 A_d 는 knee brace의 단면적이고, $A = \xi l_b \sin \theta$, $B = d_b \cos \theta$, $K_d = \frac{A_d E \cos \theta}{\xi l_b}$ 이고, l_b , d_b , θ , ξ 는 각각 보길이/2, 보의 춤, 보와 knee brace가 이루는 각도, l_b 와 knee brace의 수평길이 비를 나타내고, L 은 기둥의 길이, Q 는 기둥에 가해지는 횡하중, δ 는 횡변위를 나타낸다. 하중-변위의 관계는 그림 2(b)와 같이 이선형 이력특성을 나타낸다.

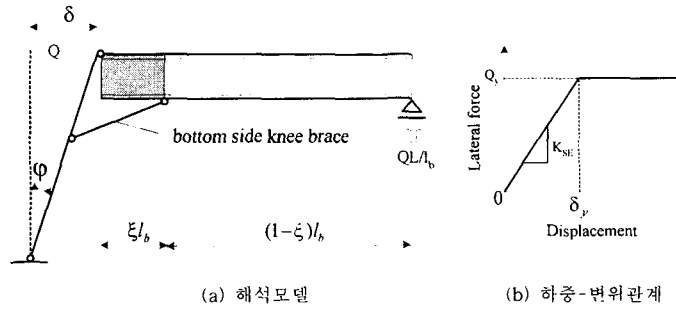


그림 2. 역학적 모델 및 힘-변위 관계

3. knee brace가 설치된 구조물의 성능설계

본 절에서는 knee brace가 보의 하부에만 설치된 구조물을 현행 내진설계기준²⁾에 따라 설계한 후, 내진성능을 ATC-40³⁾, FEMA-273⁴⁾ 등에 제시된 정적 비탄성 해석방법에 따라 평가하고, 주어진 성능수준을 만족하기 위해 필요한 knee brace의 설계 방법을 제시하였다.

3.1 CSM을 이용한 구조물의 내진성능 평가

CSM은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 나타내는 능력스펙트럼과 구조물에 작용하는 지진의 요구를 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)형식의 요구스펙트럼으로 변환한 후 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 성능점을 산정하고, 내진성능을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다. 구조물의 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 최상층의 횡변위(Δ_R)와 밀면전단력(V)으로 표현된다. 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 응답변위(S_d)와 응답가속도(S_a)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. 1차 모드가 지배적인 경우 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 S_d 와 S_a 의 능력스펙트럼으로의 변환은 식(1)에 의하여 수행할 수 있다.

$$S_a = \frac{V}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma_1 \phi_{R1}} \quad (3)$$

이 때 변환식에 이용되는 모드참여계수(Γ_1)와 유효모드질량(M_1^*)은 다음과 같다.

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad M_1^* = \frac{(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad (4)$$

유효주기(T_{eff})는 S_a 와 S_d 의 관계에서 구해지며 스펙트럼 상에서는 방사의 형태로 나타난다.

요구스펙트럼은 일반적으로 주기에 대한 응답변위, 응답속도, 응답가속도의 관계로서 표현되지만 능력스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위하여 S_d 와 S_a 좌표계의 ADRS형식으로 표현된다. 이 변환에는 식(5)의 관계를 이용한다.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (5)$$

구조물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 나타내고 높은 감쇠 요구스펙트럼은 구조물의 비탄성 응답을 나타낸다. 그림 1에서 점선은 구조물의 능력곡선으로 이것을 등가의 이선형(bilinear) 곡선으로 표현한다. 등가 이선형 곡선의 이력거동에 의하여 소산된 에너지를 이용하여 등가점성감쇠비(β_{eq})를 구한 후 구조물의 이력특성을 고려하여 유효감쇠비(β_{eff})를 산정한다. 여기서 등가점성감쇠비와 유효감쇠비는 식(6), (7)을 이용하여 산정할 수 있다.^{3,4)}

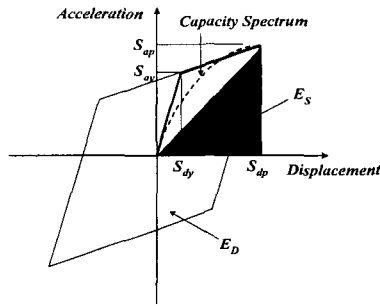


그림 3. 등가감쇠비의 산정

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (6)$$

$$\beta_{eff} = \beta + \kappa \beta_{eq} \quad (7)$$

여기서 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지를 나타내며 마름모의 면적을 말하며, E_S 는 구조물의 최대 변형에너지로 빗금친 삼각형의 면적이다. β 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다. 그러나 지진하중을 받는 구조물은 여러 가지 효과들에 의하여 그림 3과 같은 이상화된 이력특성을 나타내지 못한다. 따라서 ATC-40과 FEMA-273에서는 이러한 구조물의 이력특성을 반영하기 위하여 식(7)의 우변과 같이 감쇠조정계수(κ)를 사용하여 유효감쇠비를 조정하도록 하고 있다.

3.2 목표성능을 만족하기 위한 knee brace의 설계

특정한 구조물에 대하여 내진성능 목표변위를 정하고, 산정된 성능점이 주어진 목표변위를 초과하는 경우, 성능목표를 만족하기 위해 필요한 등가감쇠비를 CSM을 이용하여 구할 수 있는데, 능력곡선상의 목표변위에 해당하는 지점을 지나는 요구스펙트럼의 감쇠비에서 5% 초기 감쇠비를 제한 값이 knee brace에 의하여 추가되어야 하는 등가감쇠비 β_d 가 된다 (그림 5),

필요한 knee brace의 양은 등가감쇠비로부터 산정할 수 있다. 필요한 등가감쇠비에 해당하는 크기의 knee brace가 시스템에 추가되면 그림 6에 나타난 바와 같이 구조물의 전체 강성이 증가하

계 되어, 시스템의 능력곡선이 변하게 된다. 이를 고려하기 위하여 아래의 식(8)과 (9)를 이용하여 추가되는 knee brace의 강성과 시스템 강성의 비(S_r)를 구하고, 능력곡선을 수정하여 목표변위까지 제어하기 위해 필요한 등가감쇠비를 다시 구하게 되고, 그 값이 수렴할 때까지 이러한 과정을 반복한다.

$$\beta_d = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4(\delta_{sp} - \delta_{by})Q_y}{\frac{1}{2}K_{sec}\delta_{sp}^2 + \frac{1}{2}Q_y\delta_{sp}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(\mu - 1)S_r}{\mu(\mu\Psi + S_r)} \quad (8)$$

$$S_r = \frac{K_{added}}{K_{initial}} = \frac{\pi\mu^2\beta_d\Psi}{2(\mu - 1) - \pi\mu\beta_d} \quad (9)$$

여기서 $K_{sec} = \Psi K_{initial}$ 이다. $K_{initial}$ 은 초기 설계된 knee brace가 설치된 시스템의 초기강성을 나타내며, K_{added} 는 추가되는 가새의 횡강성이다. 그리고 $\Psi = \frac{\alpha\mu - \alpha + 1}{\mu}$, $\mu = \frac{\delta_{sp}}{\delta_{by}}$, α 는 항복 후 강성비, $\delta_{by} = \frac{\xi l_b \sigma_y L}{(A+B)E \cos \theta}$, $A = \xi l_b \sin \theta$ $B = d_b \cos \theta$ 이다. 가새의 항복후 강성을 무시할 경우 식(10)을 이용하여 pushover 해석없이 강성비를 구할 수 있다.

$$\beta_d = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{(\mu - 1)S_r}{\mu(1 + S_r)} \right\} \quad S_r = \frac{K_{added}}{K_{initial}} = \frac{\pi\mu\beta_d}{2(\mu - 1) - \pi\mu\beta_d} \quad (10)$$

성능목표를 만족하기 위하여 필요한 knee brace의 단면적(A_d)은 위의 과정을 통해 최종적으로 산출한 β_d 를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_d = \frac{\frac{2\pi^3 m}{T^2} \beta_d \delta_{sp}}{\sigma_y \left(\frac{\delta_{sp}}{L} (A+B) - \frac{\xi l_b \sigma_y}{E \cos \theta} \right) - \frac{\pi(A+B)E}{2L} \beta_d \cos \theta} \quad (11)$$

여기서 T 와, m 은 각각 구조물의 탄성주기와 질량이며, δ_{sp} 은 구조물의 목표변위를 나타낸다.

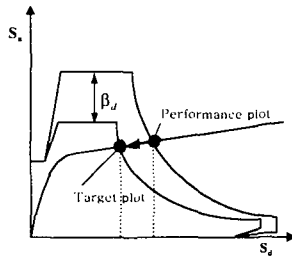


그림 4. 요구되는 등가감쇠비의 산정

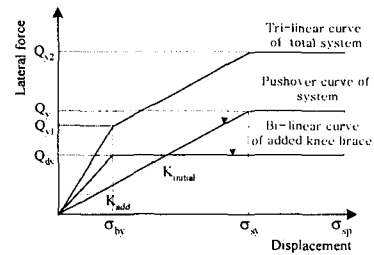


그림 5. 추가되는 가새에 의한 구조물의 힘-변위관계의 변화

3.3 knee brace의 층별 분배

다층 구조물인 경우에는 등가의 단자유도계로 치환하여 위의 절차에 따라 성능점을 산정하고,

필요한 유효감쇠비를 산출한다. 이러한 감쇠비를 만족시키기 위한 knee brace의 각 층별 설치 단면적은 식(11)을 다자유도계에 적용되도록 변형한 식(12-a)과 식(12-b)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$A_d = \frac{\frac{2\pi^3}{T^2} \beta_d \sum_j m_j \delta_{spj}}{\sigma_y \sum_j \gamma_j \left(\frac{\delta_{spj}}{L} (A+B) - \frac{\xi l_b \sigma_y}{E \cos \alpha} \right) - \frac{\pi(A+B)}{2L} \beta_d \sum_j \gamma_j \delta_{spj} E \cos \alpha} \quad (12-a)$$

$$A_{di} = \gamma_i A_d \quad (12-b)$$

여기서 A_{di} 는 i 층의 knee brace 단면적이고, γ_i 는 층별 면적분배계수로써 층간변위비, 층강성비 등의 적절히 방법을 이용하여 구한다.

4. knee brace의 최적 설치각도

본 절에서는 1층의 철골 구조물을 이용하여, knee brace의 설치 각도(θ), 항복강도(σ_{by}) 및 단면적(A_b) 등의 설계변수가 등가감쇠비(β_{eff}) 및 변위응답에 미치는 영향을 파악하였다. 철골 구조물은 기둥 H250×250×9×14, 보 H400×200×8×13으로 이루어져 있으며, 높이는 4m, 경간은 6m이다. 일반적으로 knee brace의 수직 높이는 천장에서부터 보 밑면사이의 거리이므로 고정된 것으로 가정하였다. 기둥은 보 및 기초와 한지로 연결되어 있다. 변수분석을 위하여 El Centro(1940, NS) 지진을 입력하중으로 비선형 동적해석을 수행하였다. 동적해석에는 비선형해석 프로그램인 DRAIN2D+⁵⁾를 사용하였다.

그림6과 7은 예제 구조물에 대한 knee brace의 설치각도, 단면적, 항복강도에 따른 등가감쇠비와 지진하중에 의한 최대변위의 변화를 나타낸다. knee brace의 항복응력은 1.0 tonf/cm², 2.4 tonf/cm², 3.3 tonf/cm²의 세 가지 경우를 사용하였으며, 단면적은 예제구조물의 층간변위가 붕괴 방지수준(층고의 2.5%)을 만족할 때를 기준으로 점차적으로 단면적을 증가시켜 인명안전수준(층고 1.5%)을 만족할 때까지 일정하게 변화시켰다. $\sigma_{by}=1.0\text{tonf/cm}^2$ 의 가새와 횡강성이 같도록 다른 항복응력의 가새의 단면적을 산정하여, 모든 항복응력에 대하여 동일한 횡강성을 갖도록 하였다. 등가감쇠비는 소산되는 에너지와 저장되는 에너지의 비로 구할 수 있으며, 압축과 인장에 대하여 동일한 거동을 하는 경우 pushover 곡선으로부터 간단히 구할 수 있다.³⁾

해석 결과에 따르면 $\sigma_{by}=1.0\text{tonf/cm}^2$ 인 경우 같은 횡강성을 갖는 다른 항복응력의 가새에 비해 최대변위가 작아 변위제어에 더 효과적임을 알 수 있다. 또한 단면적의 크기가 커질수록 최대변위가 감소하는 현상이 뚜렷하게 나타났다. 항복응력이 1.0tonf/cm²인 경우는 θ 가 20° ~ 30° 정도에서 최대변위가 최소값을 가지고, 20° 이하에서는 최대변위가 급속하게 증가함을 볼 수 있다. 또한 등가감쇠비도 $\theta = 20^\circ$ 이상에서는 일정한 값을 가지지만 20° 이하에서는 작아진다. knee brace의 항복응력이 큰 나머지 두 가지 경우는 knee brace의 크기가 증가함에 따라 변위의 변화는 불규칙하고, 대체적으로 가새의 각도가 약 40° 일 때 최대변위가 최소가 되며, 이때 등가감쇠비가 최대가 됨을 알 수 있다.

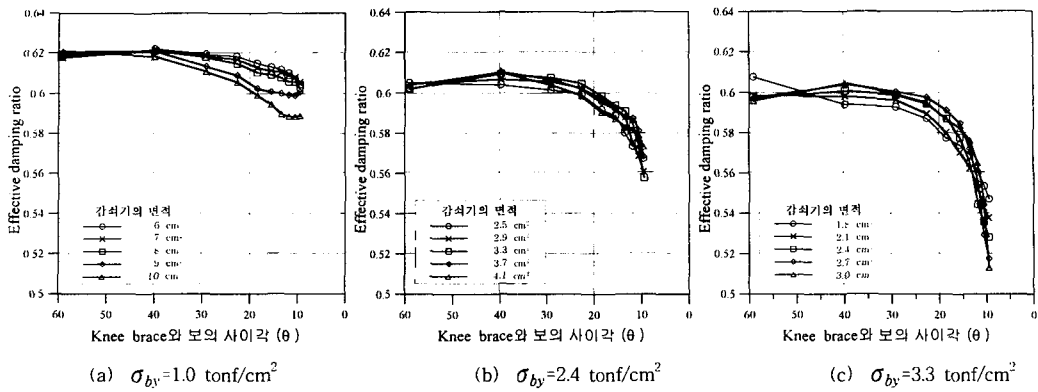


그림 6. knee brace의 설치각도에 따른 등가감쇠비의 변화

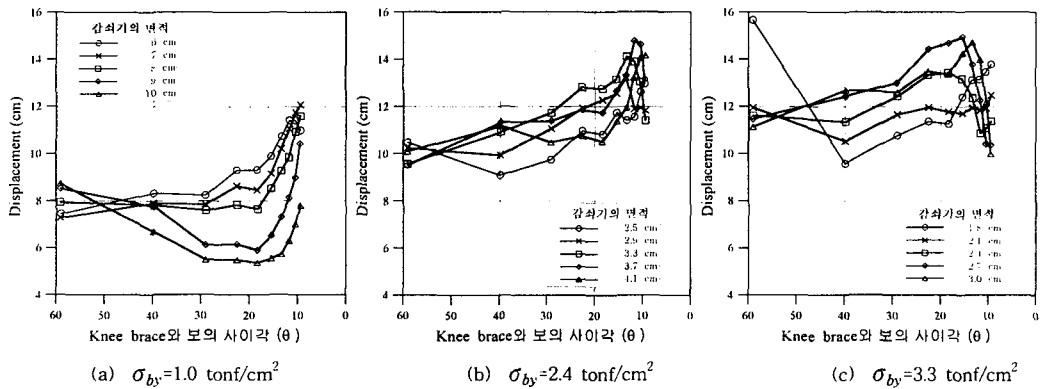


그림 7. knee brace의 설치각도에 따른 최대변위의 변화

5. 결론

본 연구에서는 지진하중에 보-기둥 접합부를 힌지로 처리하고 비좌굴 knee brace를 설치하여 횡력을 부담하는 구조 시스템의 역학적 모델을 제시하고, 성능에 기초한 내진설계법을 제시하였다. 단자유도계의 변수분석결과 낮은 항복응력의 knee brace를 보와 20° ~ 30°의 각도로 설치할 경우 에너지의 소산량이 증가하고 최대변위가 감소하였다. 또한 낮은 항복응력의 knee brace를 사용하였을 때 knee brace 면적의 크기에 따른 구조물의 변위 변화가 뚜렷하게 나타났다.

참고 문헌

1. Suita, K., Inoue, K., Takeuchi, I., and Uno, N., "Mechanical Behavior of Bolted Beam-to-Column Connections with Hysteretic Damper," The 3th Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Taipei, Taiwan, 2001.
2. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000
3. ATC(1996), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.

4. FEMA(1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," FEMA273, October, Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency.
5. Tsai, K.C. and Li, J.W., "DRAIN 2D +, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.