



휨강도와 전단강도의 확률분포를 고려한 연결보의 성능기반설계

김윤곤 ^{1)*} · 조석희 ¹⁾

¹⁾현대건설(주) 연구개발본부

Performance Based Design of Coupling Beam Considering Probability Distribution of Flexural and Shear Strength

Yun-Gon Kim ^{1)*} and Suk-Hee Cho ¹⁾

¹⁾Hyundai Engineering & Construction, R&D Division, Yongin 446-716, Korea

ABSTRACT In this paper, performance based design of coupling beam using non-linear static analysis is proposed considering probability distribution of flexural and shear strength in order to develop flexural hinge. This method considers post-yielding behavior of coupling beam and stress redistribution of system. It can verify the reduced effective stiffness to meet the current design requirement based on linear analysis. It also evaluates the lateral displacement under service load (un-factored wind load) properly. In addition, it can optimize the coupled shear wall system by taking stress redistribution between members into account. For a simplified 30-story building, non-linear static (push-over) analysis was performed and the structural behavior was checked at performance point and several displacement steps. Furthermore, system behavior according to the amount of reinforcement and depth of coupling beam was explored and compared each other.

Keywords : effective stiffness, coupling beam, performance based design, coupled shear wall, probability distribution

1. 서 론

선형해석은 다양한 하중조합을 한 번의 해석으로 고려할 수 있어 현행 건축구조기준(KBC2009)¹⁾의 부재 설계 방법으로 적합하다. 하지만 선형설계는 부재의 항복 이후 비선형거동과 이에 따른 부재간 내력 재분배를 고려할 수 없어 선형해석상 요구내력을 만족하지 못하는 경우가 빈번하게 발생하며, 대표적으로 연결보가 이 경우에 속한다. 연결보는 단일벽체가 수직의 연속된 개구부로 인해 양측 개별벽체로 나뉠 때, 이 벽체들을 서로 연결하여 일체거동을 유도하는 병렬전단벽의 최적설계를 위한 필수요소이다.²⁻⁴⁾ 하지만 일반적으로 연결보는 설계하중에서 비선형 거동하기 때문에 선형해석에서 연결보의 시스템 기여분을 반영하기 힘들다. 이에 실무에서는 연결보의 비선형거동을 활선강성을 사용하여 선형해석상 요구내력을 저감하도록 하는 유효강성 개념을 적용하여 간접적으로 고려하고 있다. 하지만 이 방법은 선형해석상 부재 내력비를 만족할 때까지 유효강성의 가정 및 구

조해석을 반복수행해야 하며, 결정된 유효강성 또한 부재의 항복 이후 거동을 임의로 가정한 것으로 그 적합 여부를 검증할 필요가 있다.

이에 선형해석에서 연결보가 설계응력비를 만족하지 못하더라도 비선형정적해석을 수행하여 연결보의 항복 이후 거동과 이에 따른 전체시스템의 안정성을 평가하여 적합하다면, 선형해석에서 이를 허용하는 방법을 제안하였다. 즉 연결보의 배근은 하중조합에 의해 결정되는 요구내력에 대하여 설계하는 것이 아니라 외력과 상관없이 연결보의 성능에 근거하여 설계하고, 시스템에서 연결보의 기여분만을 반영한다는 점에서 연결보의 성능기반설계라고 할 수 있다. 이 방법을 적용하여 단순화된 30층 건물을 대상으로 극한하중에서 시스템의 성능을 평가하고, 사용하중에서의 연결보 강성을 보정한 후 시스템의 횡변위를 검토하였다. 또한 연결보의 힌지형태, 배근량 및 보 춤에 따른 전단벽 시스템의 거동변화를 분석하였다.

2. 연결보의 유효강성과 비선형해석

2.1 철근콘크리트 부재의 강성

Fig. 1과 같이 철근콘크리트 부재는 균열이 발생하기

*Corresponding author E-mail : yungon.kim@hdec.co.kr

Received December 13, 2012, Revised July 8, 2013,

Accepted August 20, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

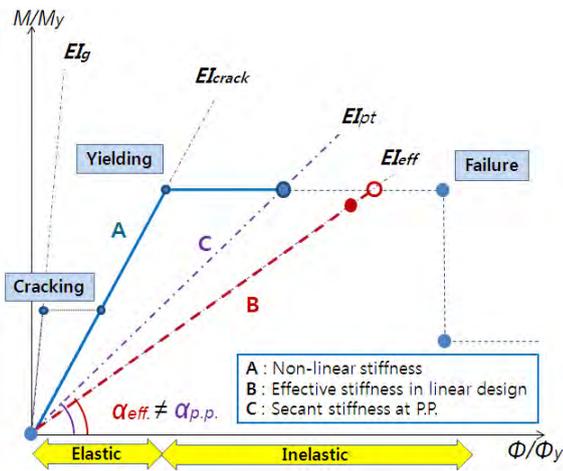


Fig. 1 Effective stiffness of reinforced concrete member

이전에는 전단면강성을 적용할 수 있지만, 균열 이후 항복까지 강성이 점차적으로 감소하고 항복 이후 강성은 급격히 저하한다. 하지만 선형해석에서는 항복시 부재강도와 변형을 기준으로 부재강성을 정의하므로, 철근콘크리트 부재의 경우 균열을 고려하는 것이 적절하다. 하지만 실무에서는 균열에 의한 강성저감 없이 전단면 강성을 선형해석에 적용하는 경우가 많다. 하지만 이는 설계 응력비가 균열이 발생하지 않을 정도로 작은 경우에만 유효한 가정이다.

또한 연결보와 같이 극한하중에서 비선형 거동하는 부재에 대하여 현행(선형)구조해석에서는 소성구간의 변형값을 이용한 할선강성을 유효강성으로 적용하여 간접적으로 부재의 비선형거동을 고려한다. 하지만 비선형거동을 고려한 성능기반설계에서는 대상하중에 대한 강성 및 변위를 적절히 반영해야 한다. 또한 선형해석에서도 극한하중에 대한 부재설계가 아니라, 사용성 검토를 위한 횡변위 산정이나 풍응답 저감을 구조물의 고유주기를 결정할 경우 극한하중을 대상으로 결정된 부재 유효강성을 적용하는 것은 적절하지 않다.

2.2 문헌조사(ATC 72-1)

최근 성능기반설계에 대한 관심이 지속적으로 증가하면서 많은 문헌에서 비선형해석과 부재강성에 대한 연구 결과 및 관련지침⁵⁻⁸⁾이 제시되고 있다. ‘PEER/ATC-72-1, Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings(2010)’ 중, Haselton et al.(2008)은 항복강도를 항복변형으로 나누는 할선강성을 부재강성으로 사용하는 것 뿐 아니라, 사용하중에서의 부재강성을 정확히 반영하기 위해 항복강도의 40%의 강도와 그 때의 변형을 이용한 강성을 별도로 정의하여 탄성범위 내에서도 하중에 따른 강성차이를 반영하였다. 또한 이 문헌에서는 기동 연성도에 따른 전단강도 저하를 고려하고, 이에 따라 파괴모드를 구분하였다(Fig. 2). 즉 과도한 변형에서 전단내력이 저하되는 것을 고려하여, 전

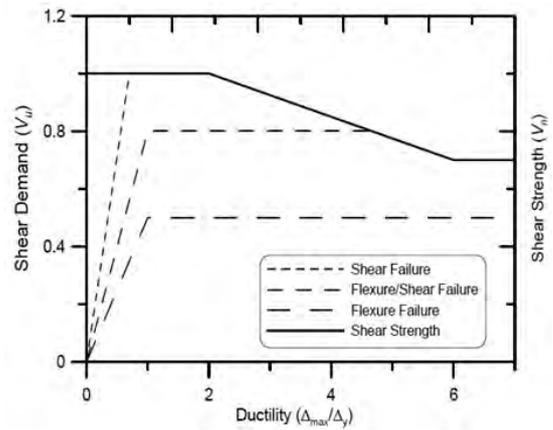


Fig. 2 ASCE/SEI41-06 variation in column shear strength vs. ductility demand (ATC72-1, 2010)

단내력이 요구내력의 약 50% 이하가 되어야만 전단내력 저하와 상관 없이 항상 휨파괴가 발생하는 것으로 정의하였다. 그 외의 경우는 일차적으로 휨항복을 하더라도 과도한 변형시 전단파괴가 가능함을 의미한다.

또한 현행 유효강성의 저감은 과도한 변형에 따른 강도저하를 고려하지 않으므로, 극한변형에 의해 정의할 수 있는 유효강성의 하한치와 변형에 따른 강도 값을 정의할 필요가 있다. 특히 전단힌지는 비선형변형이 휨에 비해 작고 강도저하가 크기 때문에 이에 대한 힌지의 실제 거동특성을 파악하기 힘들다. 따라서 전단힌지보다는 가급적 휨힌지 거동하도록 부재 설계하는 것이 바람직하다.

2.3 연결보 및 병렬전단벽의 거동과 유효강성

일반적으로 연결보는 초기에 항복 및 비선형 거동하므로, 선형해석으로는 극한설계하중에서 연결보의 횡저항 기여분을 고려하기 힘들다. 하지만 연결보는 외력에 대해 필수적으로 저항하는 부재라기보다는 인접벽체들이 일체 거동하도록 변형을 구속하여 병렬전단벽의 횡강성을 증가시키는 부재이다. 따라서 연결보의 성능에 따라 이들 벽체의 거동이 달라질 수는 있으나, 연결보의 파괴만으로 건물전체가 붕괴에 이르지 않는다는. 하지만 대상 설계하중에서의 연결보 거동특성을 명확히 정의하여야만 필수 설계요소인 병렬전단벽의 요구내력을 결정할 수 있다. 또한 연결보에 의한 횡기여분을 최대한 확보할수록 개별벽체의 요구내력이 감소하여 벽체설계를 최적화 할 수 있다. 즉, 각 층마다 연결보 요구변형률 및 항복시점이 상이하기 때문에, 대상 설계하중 시점까지 항복 이후 강도의 저감 없이 변형이 증가해야 다수의 층에서 연결보에 의한 횡기여분을 최대화할 수 있다. 하지만 연결보가 전단항복 하는 경우, 비선형변형이 작고 강도 또한 급감함에 따라 층간 내력 재분배를 기대하기 힘들다. 이러한 이유로 단위 연결보 부재의 성능이 다소 저하되더라도 휨힌지 거동하도록 설계하는 것이 다수의 연결보를 통해 설계하중에서 시스템에 더 큰 횡기여분을 기대

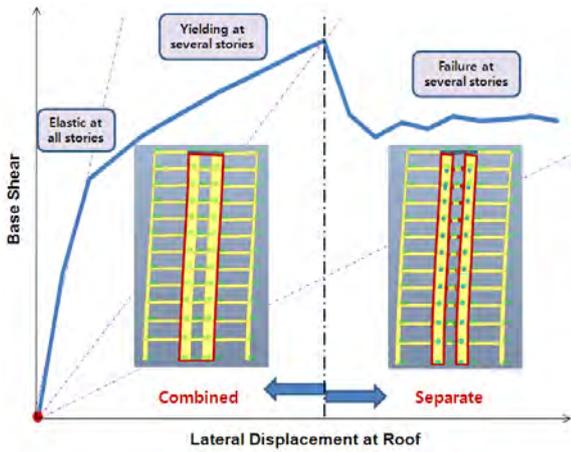


Fig. 3 Behavior of coupled shear wall

할 수 있다.

Fig. 3은 연결보를 포함함 병렬전단벽의 일반적 거동특성을 표시하였다. 연결보의 항복이 층별로 점차 증가함에 따라 병렬전단벽 시스템의 강도는 증가하지만, 강성은 점차적으로 감소한다. 하지만 연결보 파괴와 동시에 벽체가 개별가동하면서 병렬전단벽의 강도가 저하된다. 이러한 거동을 선형해석에서 고려하여 설계하기는 쉽지 않다.

3. 확률분포를 고려한 연결보 휨힌지 유도설계

3.1 현행 설계법 기반의 연결보 성능설계 적용방안

비선형해석은 성능설계가 가능하다는 장점에도 불구하고, 하중의 선형조합이 불가능하고 부재설계가 선행되어야 하는 단점이 있다. 또한 시스템의 모든 부재를 대상으로 성능 설계하는 것은 비현실적이므로, 중력 및 풍하중에 대하여 선형해석 후 부재의 일차설계를 하고 안정성 검증 및 성능평가의 관점에서 지진하중에 대하여 비선형해석을 수행하는 것이 효율적 접근이라 할 수 있다. 즉, 연결보는 성능설계의 개념에 따르고, 이 연결보의 성능만큼을 전체 시스템에 반영하여 시스템을 설계하는 것이다. 현행 선형해석에서는 연결보의 시스템 기여분에 대하여 설계자의 의도에 맞도록 조절하기 힘들어, 연결보의 응력비가 1보다 작도록 반복적으로 강성을 저감함으로써 간접적으로 연결보의 횡기여분을 조절한다. 하지만, 제안된 방법에서는 선형해석에서 연결보의 응력비가 1을 초과하더라도 비선형정적해석을 통해 전체 시스템의 안정성을 검증하여, 이를 허용한다는 측면에서 현행 방식과 차이가 있다.

3.2 확률분포를 고려한 연결보 휨힌지 유도설계

연결보 부재의 비선형거동을 전제로 한다면, 전단힌지는 그 불확실성이 크고 연성능력이 작기 때문에 휨힌지

로 유도하는 것이 유리하다. 하지만, 현재 부재설계는 요구 휨내력과 전단내력에 대해서 각각 성능을 만족하는 것만을 요구한다. 그러나 이 조건만으로는 휨항복과 전단항복 중 지배거동을 판단할 수 없다(Fig. 4(a) 참조). 이에 현 기준에서는 특별내진구조시스템을 적용하는 부재설계의 경우 소성휨모멘트를 상회하는 전단내력을 확보하여 휨힌지를 유도하도록 정하고 있으나, 실제 부재성능은 재료특성에 따른 확률분포를 가지고 편차가 있으므로 이를 추가로 고려해야만 휨힌지 유도가 가능하다. 이에 현행 기준에서 부재성능의 확률분포 개념을 통해 유도된 강도저감계수(휨: 0.9, 전단: 0.75)를 활용하여, 발생 가능한 모든 경우에 대하여 휨힌지가 먼저 발생하도록 전단내력을 결정할 수 있고, 그 세부과정은 다음과 같다(Fig. 4(b) 참조).

- 1) 연결보의 성능은 통상 전단력에 의해 결정되므로, 주어진 단면에서 최대성능을 확보하기 위해서는 설계전단력을 최대로 하는 것이 바람직하다. 따라서 연결보가 연성거동 할 수 있는 범위 내에서 단면을 최대한 확보한다(전단경간비가 작을수록 전단거동이 지배적인 깊은 보 거동을 하므로, 전단경간비는 2 이상이 되도록 한다).
- 2) 설계식 내에서 허용 가능한 최대 전단철근을 배근하여 최대 전단 성능을 확보한다($V_n = V_c + V_s < 5V_c$).
- 3) 확률분포를 고려하여 최소 전단성능을 구한다($0.75V_n$).
- 4) 연결보의 평형조건(Fig. 5)으로부터 최소전단성능을 결정하는 하중을 구한다($P_V = 0.75V_n$).
- 5) 이에 해당하는 휨성능을 구한다. 이때의 휨성능은 확률분포를 고려한 최대 휨성능이 되도록 한다($P_V = P_M = 1.1 \times 2 Mn/l_b$).

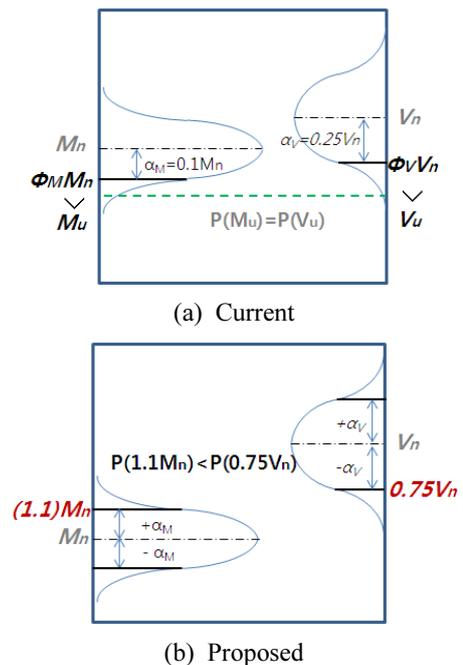


Fig. 4 Concept of ductile hinge design considering the statistical distribution of member capacity

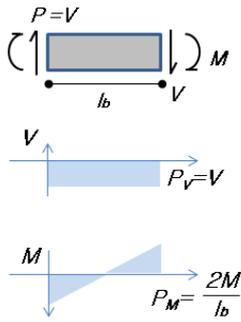


Fig. 5 Free body diagram of coupling beam

- 6) 공칭휨내력($M_n = P_M l_b / 2$)을 산정하고 이 값을 넘지 않는 범위에서 휨배근 한다.
- 7) 결과적으로 연결보의 성능은 전단내력과 상관없이 휨배근으로부터 결정되는 휨강도 저감계수를 고려한 설계 휨내력에 이르게 하는 외력값으로 정의할 수 있다.

4. 설계예제

4.1 예제모델개요

서울에 위치(설계풍속 30 m/s)한 S_D지반, 30층 규모 오피스 건물을 대상으로 연결보 거동을 직접적으로 파악할 수 있도록 평면을 단순화하였다. 기준층 층고는 4 m, 건물의 세장비(폭:높이)는 1:5에 근사하고, 8m모듈의 가로, 세로 3경간이며, 중앙에 코어벽을 배치하였다. 또한 부재별 성능차이로 인한 구조물 응답이 달라지는 것을 배제하기 위해 전층 동일한 배근으로 설계하였다(Fig. 6).

Table 1과 같이 코어벽 두께 0.6 m, 연결보 0.6 m×0.6 m, 기둥 1 m×1 m, 보 0.5~0.6 m×0.8 m이며, 콘크리트 강도는 24 MPa를 기본으로 단면 크기를 유지하기 위해 저층 기둥강도를 증가하였다. 부재 휨강성은 항복까지의 선형강성(탄성강성)으로서 수직부재는 전단면강성의 70%, 수평부재는 35%를 적용하였다.

연결보는 3장에서 제시한 방법으로 설계되었고, 이러한 성능설계방식은 비선형정적해석을 통해 부재 성능을 검증하므로, 선형해석에서의 응력비검토 및 설계를 위한 별도의 유효강성 저감은 고려하지 않았다.

4.2 해석 결과

범용 구조해석 프로그램(MIDAS Gen ver. 8.0)의 비선형정적해석(push-over analysis)을 수행하여, 변위스텝별 구조물의 거동과 성능점의 거동특성을 검토하였다. 또한 사용 풍하중에서의 시스템 거동을 기존의 방법과 비교하였다. Fig. 7은 연결보를 성능설계한 시스템의 비선형정적해석 결과와 성능점의 힌지위치를 보여준다. 또한 Fig. 8에서는 변위스텝별 힌지분포를 비교하였다. 이를 통해

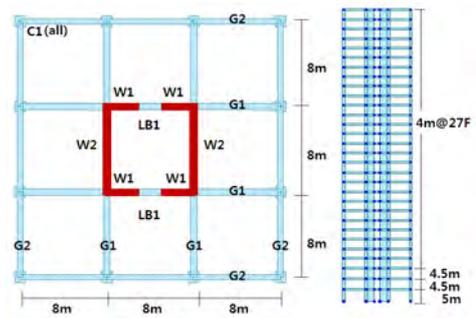


Fig. 6 Plan and elevation of example office (30F)

Table 1 Member list (shown in Fig. 6)

Member type (ID)	Size (mm)	Compressive strength (f_{ck})
Wall (W1, W2)	Thk.=600	24
Column (C1)	1000 × 1000	40 (1~4F) 30 (5~10F) 24 (11~30F)
Girder (G1)	600 × 800	24
Girder (G2)	500 × 800	24
Coupling beam (LB1)	600 × 600	24

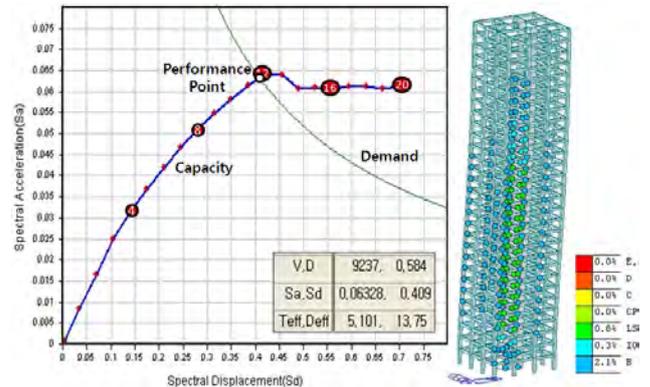


Fig. 7 Performance point (demand & capacity curve)

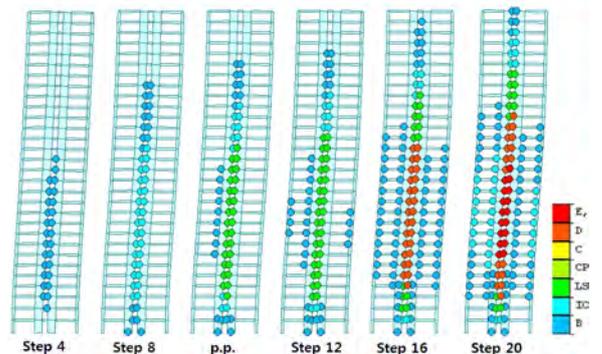


Fig. 8 Hinge distribution at different displacement steps

층별 연결보의 항복 및 비선형거동을 순차적으로 파악할 수 있으며, 과대 변위에서 일부 층의 연결보 파괴로 인해 시스템 내력이 저하되는 것을 확인할 수 있다.

변위 Step 4에서 횡저항력은 풍하중 밀면전단력(4884 kN)과 근사한 수준으로, 중저층 일부 연결보를 제외한 대부분 부재가 탄성영역에 위치하고 있다. 하지만, 성능점(step 12 부근)에서의 연결보 강성은 대부분의 층에서 4~35%의 분포를 가지고 휨진지 거동을 하였고, 이로 인해 코어벽체의 횡저항력이 저하되어 3~20층에 걸쳐 모멘트골조 보(유효강성 20% 내외)와 1~3층 벽체(유효강성 17%, 25%, 64%)에 힌지가 발생하였다. Fig. 9는 각 스텝에서 층간변위각의 분포를 나타내고, Fig. 10은 연결보의 비선형변형을 유효할선강성으로 치환하여 표현하였다. 연결보가 항복함에 따라 해당층의 층간변위각이 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 연결보 유효강성의 편차가 층별로 매우 크고 하중크기에 따라 달라지므로, 선형해석에서 이러한 유효강성의 층별 분포나 하중크기에 따른 강성을 변화를 고려하기 어렵다.

Fig. 11은 성능점에서 골조와 벽체의 층전단력 분포를 나타내었다. 벽체의 층전단력은 저층부에서 매우 크고, 상층부로 갈수록 감소하는 반면 골조의 층전단력은 모든 층에서 근사한 범위에 있다. 특히 최상층의 경우, 골조에 의한 벽체 구속으로 인해 벽체 층전단력의 방향이 반대로 나타나기도 한다.

이와 같이 부재의 항복이후 비선형구간을 고려하지 못하는 선형해석과는 달리 비선형정적해석에서는 탄성구간과 소성구간을 그대로 평가하므로 대상하중에 따른 유효강성의 수정이 필요하지 않다. 또한 선형해석에서 응력비가 1을 초과하는 개별부재(연결보)가 존재하더라도 항복 이후 다른 부재로의 내력재분배를 통해 전체 시스템의 안정성 측면에서 여유치가 충분함을 확인하였다. 단, 이 결과는 연결보 배근과 시스템에 따라 달라지므로 주어진 조건에 대하여 개별적으로 그 안정성 여부를 판정해야 한다.

4.3 풍하중 횡변위 검토

Fig. 12는 풍하중을 대상으로 선형해석의 유효강성을 저감한 것과 비선형해석을 통해 평가된 사용하중 안정성을 검토한 것이다. 거동 A는 풍하중 형태로 비선형정적해석을 하고, 거동 B는 선형해석을 위해 지진하중 성능점의 할선강성으로 부재 유효강성을 수정한 등가선형시스템의 풍하중 변위를 검토하였다(거동 C는 최초 부재설계를 위한 지진하중의 1차모드 하중패턴 적용). 거동 B의 경우 부재강성을 극한하중 수준의 유효강성으로 반영한 것으로 횡변위가 300 mm로 계산되었고, 통상적 판정기준인 $H(\text{건물높이})/500$ 수준을 초과하였다. 이 값은 사용하중시 부재강성이 적절히 반영되지 않아 보수적으로 평가된 것이지만, 이 값을 정량적으로 보정하기는 쉽지 않다. 반면 거동 A의 경우 풍하중의 부재강성은 대부분 탄성영역에 있었으며, 횡변위는 160 mm였다. 즉 극한하중에서 결정된 부재강성이 아니라, 사용하중의 부재강성을 반영

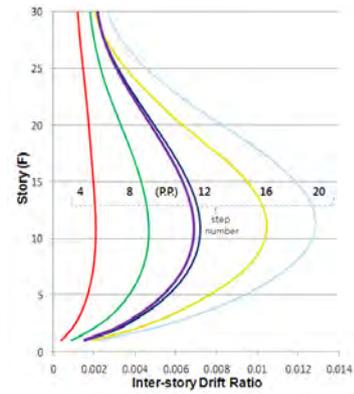


Fig. 9 Interstory drift ratio at various displacement steps

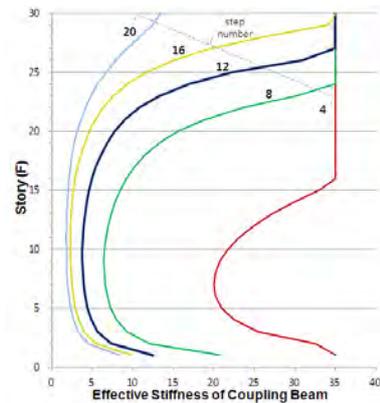


Fig. 10 Effective stiffness of coupling beam at various displacement steps

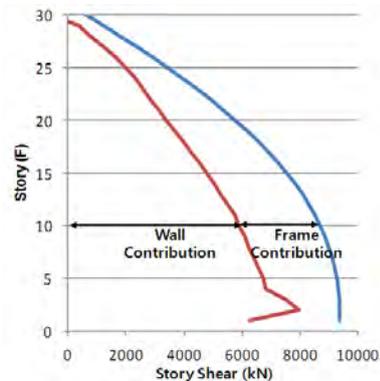


Fig. 11 Story shear at performance point

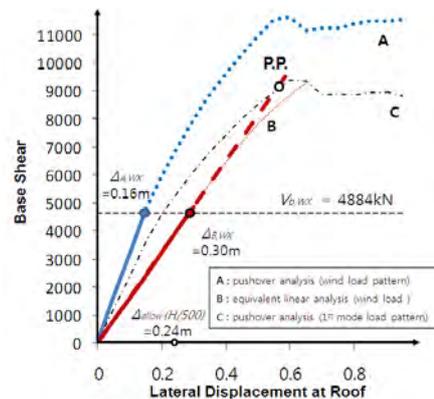


Fig. 12 Serviceability check for wind load

함으로써 정량적인 횡변위를 산출하여 사용성 적합여부를 합리적으로 평가할 수 있다.

5. 연결보 설계에 따른 시스템 거동비교

연결보의 배근 및 설계변수에 따라 연결보의 비선형거동이 상이하고 시스템 거동에 미치는 영향이 크므로, 4장의 예제모델을 이용하여 대표적인 연결보의 설계변수(휨/전단 힌지, 배근량, 보 축 등)에 대하여 비선형해석하고, 거동특성을 비교하였다.

5.1 휨힌지와 전단힌지

전단힌지가 발생한 연결보의 취성적 파괴가 시스템에 미치는 영향에 대해 예제모델을 이용하여 검증하였다. Fig. 13은 예제모델의 배근(F-H)을 기준으로 휨배근을 증가하여 전단힌지 거동을 하는 경우(S-H)와 반대로 전단보강근 양을 작게 하여 전단힌지 거동하는 경우(S-L)를 비교하였다. 또한 S-L의 배근에서 다시 휨힌지 거동하도록 휨배근량을 재조정된 경우(F-L)를 추가하여 연결보 배근량에 따른 성능을 비교하였다. 부재 항복 이전의 시스템 강성은 모두 동일하지만, F-L의 경우 휨힌지가 가장 먼저 발생한다. 하지만 S-L의 경우 전단힌지가 2500 kN 정도에서 발생하여 시스템내력이 급격히 감소된다. 그 이유는 전단힌지가 발생한 연결보는 항복 이후 부재내력이 유지되는 것이 않고 감소하므로, 그 자체내력의 감소분을 다른 부재가 부담해야 하므로 내력재분배를 기대하기 힘들다. 따라서 연결보의 힌지가 층별로 하중증가에 따라 순차적으로 발생하는 것이 아니라, 일시에 연쇄적으로 발생하게 된다. 이러한 이유로 S-L의 경우 F-L보다 연결보의 배근량은 증가하였음에도 전단힌지에 의한 재분배가 이루어지지 않아 시스템 내력은 더 작아졌다. 이러한 현상은 S-H와 F-H의 관계에서도 동일하게 확인된다. 또한 S-H와 S-L의 거동이 궁극적으로 유사해지는 이유는 연결보의 기여분을 제외한 벽체만의 시스템 내력이

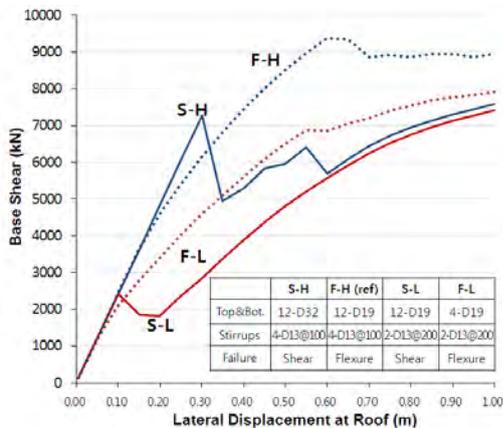


Fig. 13 Comparison of system response between shear and flexure failure system

기 때문이다.

5.2 연결보 배근량

부재 배근에 따른 거동특성의 차이를 검토하기 위하여 예제모델의 연결보 휨배근을 12-D19에서 8-D19, 4-D19로 각각 감소하고, 전단배근은 3장의 방법에 따라 휨힌지를 유도할 수 있도록 조정하였다. Fig. 14는 위의 3가지 경우에 대하여 비선형정적해석을 수행한 결과를 나타내고 있으며, 성능점의 밀면전단력, 최상층변위, 유효주기, 유효감쇠는 Table 2에 표기하였다.

연결보의 휨배근이 작을수록 초기에 항복하여 성능점에서의 밀면전단력이 작고, 횡변위량이 증가하였다. 하지만, 연결보의 시스템 횡기여분이 크지 않으므로, 연결보의 파괴에 따른 시스템 거동특성의 변화는 거의 없었다. 특히 4-D19인 경우 성능점이 일부 연결보의 파단 이후에 발생하였음에도 불구하고 시스템의 강도저하가 거의 없었다. 이러한 경우가 보통 설계자가 연결보의 횡기여분을 의도적으로 작게 하여 연결보의 비선형거동을 배제하고 시스템을 선형해석으로 평가하는 것에 해당한다. 하지만, 이러한 설계는 연결보의 초기항복으로 인해 시스템 강성이 감소하고, 이에 의해 유효주기 및 감쇠가 증가하면서 성능점의 지진하중이 작아지게 된다. 따라서 연결보 휨배근에 따른 시스템의 강성 차이에도 불구하고 성능점에서의 횡변위는 큰 차이가 없다. 하지만 사용 풍하중(약 5000 kN)에서의 거동을 비교하면, 연결보 배근이 작을 때 더 큰 변위가 발생하므로, 사용하중시 시스템

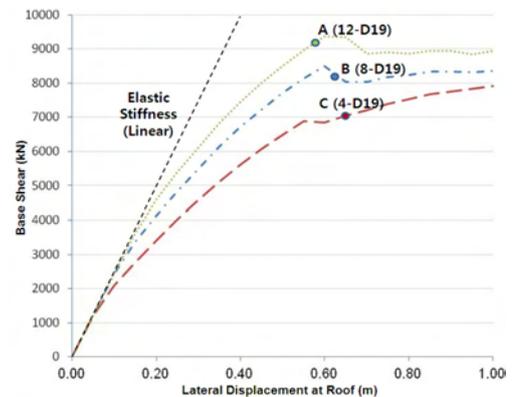


Fig. 14 Comparison of system responses with various flexural reinforcement

Table 2 Values at performance point with various flexural reinforcement

	12-D19	8-D19	4-D19
Base shear (kN)	9237	8227	7056
Lateral displacement at roof (m)	0.58	0.63	0.65
Effective period T_{eff} (sec)	5.1	5.6	6.2
Damping ratio D_{eff}	13.8	14.7	17.3

성능을 향상하기 위해서는 연결보 배근을 최대화하여 강성을 유지해야 한다(Fig. 14). 또한 연결보 강성 기여분을 무시하고 시스템 거동을 단순화한 선형해석시 시스템의 강성이 보수적으로 평가되어 지진하중을 과소평가할 가능성 역시 높다. 물론 이 경우 벽체는 개별 거동하는 것으로 평가하므로, 불안전측 부재설계가 된다고 단정할 수 없으나, 실제 거동과 상이한 것은 분명하다.

Fig. 15는 성능점의 층별 연결보 유효강성과 층간변위 각을 표시한 것이다. 탄성구간의 유효강성은 전단면강성의 35%로 가정하였고, 비선형거동의 유효강성은 성능점의 활선강성으로부터 산정하였다. 연결보 배근에 따른 성능점의 층간변위각은 큰 차이는 없지만, 층간변위각의 층별 분포는 부재배근이 클 때 저층부의 층간변위각은 더 크고 고층부의 층간변위각은 더 작았다. 그 이유는 상층부가 탄성거동하면서 적게 변형하는 것과 반대로 하층부의 경우 항복구간에 더 집중되어 변형하기 때문이다. 또한 연결보의 유효강성 층별분포에서 전단면강성의 5% 이하인 경우 파괴에 이른 것으로 판단할 수 있으나, 연결보 자체 성능이 크지 않아 전체 시스템에 미치는 영향은 미비하였다.

5.3 연결보 춤

연결보 춤은 보통 휨힘지에 의한 연성거동을 확보할 수 있는 범위 내에서 최대한으로 확보하는 것이 벽체의 일체 거동에 유리하다. 보 춤에 의한 시스템 거동을 비교하기 위해 보 춤을 600 mm에서 900 mm, 1200 mm까지 증가시켜 비선형 해석하였다. 연결보는 각 경우에 휨배근 12-D19, 전단배근 4D13@100을 동일하게 배근하여 춤이 증가분에비례하여 휨내력과 전단내력이 증가되도록 하였다. 각 경우의 시스템 거동결과는 Fig. 16과 같으며, 각 성능점의 밀면전단력, 최상층 변위, 유효주기, 유효감쇠는 Table 3에 표시하였다.

연결보 춤이 클수록 시스템 초기강성이 크고, 연결보

의 항복내력 역시 커지므로 더 우수한 시스템 거동을 보이게 된다. 한편 연결보 춤이 클 때, 시스템 강성이 증가하고 고유주기가 감소하면서 성능점 지진하중은 증가하였다. 성능점 위치가 연결보 파괴로 인한 내력저하 이전 시점이고, 비록 연결보가 항복 이후 큰 비선형변형이 발생했다고 하더라도 건물의 최대 층간변형각이 0.007이므로 시스템 전체의 안정성은 확보된 것으로 판단할 수 있다(Fig. 17). 또한 성능점의 층별 유효강성 분포를 보면 보 춤이 클 때 연결보가 탄성인 층의 수가 증가하는 반면, 항복한 층의 유효강성은 더 작게 나타나는 경향을 보였다. 이는 코아벽체와 골조의 횡저항 강성비의 관점에서 볼 때, 연결보의 춤이 큰 경우 연결보를 포함한 코아벽체에 의한 횡저항 분배율이 더 커져 연결보에 의해 전달되어야 할 힘이 더 커지기 때문으로 추정 가능하다.

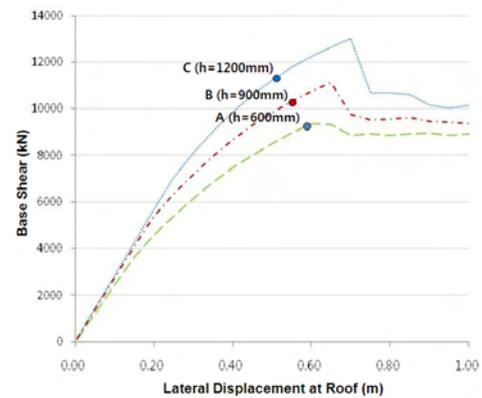


Fig. 16 Comparison of system response with various beam depths

Table 3 Values at performance point with beam height

	h=600	h=900	h=1200
Base shear (kN)	9237	10240	11210
Lateral displacement at roof (m)	0.58	0.54	0.51
Effective period T_{eff} (sec)	5.1	4.5	4.2
Damping ratio D_{eff}	13.8	13.1	12.2

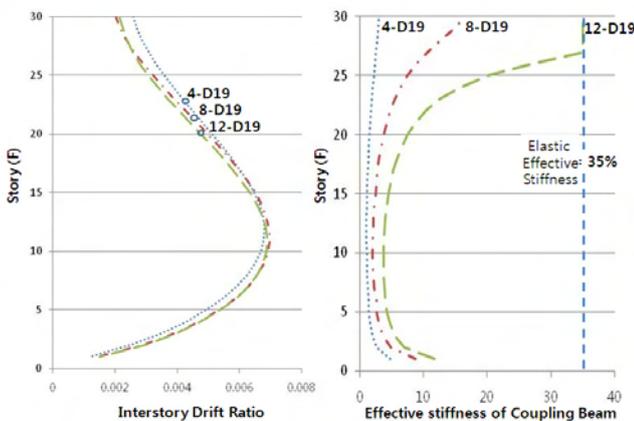


Fig. 15 Comparison of interstory drift ratio and effective stiffness of coupling beam with various flexural reinforcement

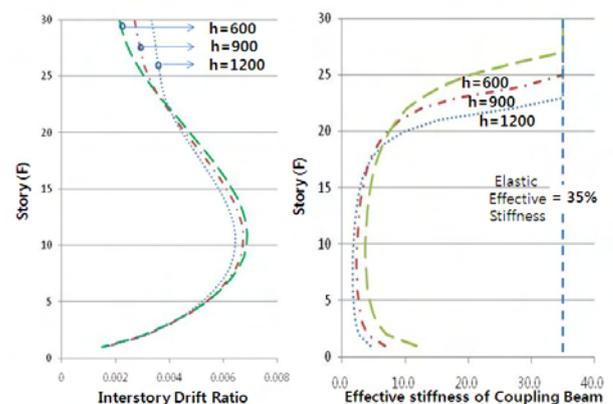


Fig. 17 Comparison of inter-story drift ratio and effective stiffness of coupling beam with various beam depths

6. 결 론

현행 선형해석에서 요구내력을 만족하지 못하는 연결보의 경우, 유효강성을 저감하여 항복 이후 비선형거동을 간접적으로 고려하여 설계한다. 하지만 이러한 설계가 실제 시스템에 미치는 영향을 다루는 연구는 미비한 실정이다. 이에 비선형정적해석을 통해 연결보의 강성에 의한 시스템거동을 평가하고, 연결보의 시스템 기여분이 내력재분배를 통해 최대한 유지하도록 휨과 전단강도의 확률분포를 고려한 연결보 휨한지 유도 설계법을 제안하였다. 이 방법을 30층 오피스에 적용하여 시스템 안정성을 검증하고, 연결보 배근과 보 춤에 따른 거동특성을 검토하였다. 이를 통해 도출된 제안방법의 장점은 다음과 같다.

- 1) 비선형해석은 부재의 항복 이후 비선형 거동에 의한 시스템의 내력재분배를 고려하여 시스템의 안정성을 평가할 수 있다.
- 2) 선형설계시 임의로 가정한 연결보 유효강성을 비선형해석을 통해 산정된 성능점의 비선형거동 활선강성과 비교함으로써 검증하고, 시스템 성능을 평가할 수 있다. 설계예제의 경우, 성능점의 연결보 강성은 층별로 4~35%로 다양하였고, 일부 상층부에 위치한 연결보는 탄성거동하였다. 또한 층간변위각은 0.003(최상층, 저층)~0.007(중간층)로 분포하였으며, 연결보의 유효강성과 상관관계가 크게 나타났다.
- 3) 확률분포를 고려한 연결보 휨한지 유도설계를 통해 연결보의 전단 취성과괴를 방지하여 시스템 안정성 및 내력을 향상할 수 있다.
- 4) 횡변위 기준을 만족하지 못하는 고층건물의 경우, 부재설계시 사용한 극한하중의 유효강성이 아니라 사용하중의 유효강성을 적용하여 검토할 수 있다. 설계예제의 경우 이를 고려하여 횡변위를 0.30 m에

서 0.16 m로 약 60%수준으로 평가하였다.

- 5) 비선형해석을 통해 연결보의 배근량과 보 춤에 따른 시스템의 거동특성을 변위(또는 하중) 단계별로 파악하고, 이를 고려한 시스템의 성능설계를 할 수 있다.

참고문헌

1. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code and Commentary* (KBC2009), Kimoondang Publishing Company, 2010, 1040 pp.
2. Paulay, T. and Priestley M. J. N, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, inc., 1992, 744 pp.
3. Eljadei, A. A., "Performance Based Design of Coupled Shear Wall Structures," Ph.D Dissertation, Univ. of Pittsburgh, 2012, 200 pp.
4. Moehle J. P., Hooper J. D., Kelly D. J., and Meyer T. R., "Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Walls and Coupling Beams: A Guide for Practicing Engineers," NEHRP Seismic Design Technical Brief No. NIST GCR 11-917-11rev-1, 2011, 37 pp.
5. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building," FEMA 356 Report, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000, 516 pp.
6. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Improvement of Non-Linear Static Seismic Analysis Procedures," FEMA 440 Report, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2005, 392 pp.
7. PEER/ATC-72-1, "Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings," Applied Technology Council, 2010, 242 pp.
8. Deierlein, G. G., Reinhorn A. M., and Willford M. R. "Nonlinear Structural Analysis for Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers," NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4, NIST GCR 10-917-5, 2010, 32 pp.

요 약 이 연구에서는 휨한지를 유도하기 위해 휨강도와 전단강도의 확률분포를 고려한 연결보의 성능기반설계법을 제안하였다. 이 방법은 연결보의 항복 이후 거동과 시스템의 재분배를 반영하므로 현행 선형해석 기반의 연결보 설계에서 임의로 저감된 유효강성의 적합성을 검증할 수 있으며, 사용하중에서의 연결보의 실제 강성을 반영하여 횡변위를 평가하는데 적절하다. 또한 부재간 내력 재분배를 고려할 수 있어 병렬전단벽의 최적설계가 가능할 것으로 판단된다. 이 설계법의 적합성을 검증하기 위해 단순화된 30층 오피스 건물을 대상으로 비선형정적해석을 수행하고 성능점 및 각 스텝의 구조성능을 검토하였다. 또한 사용하중의 부재강성을 평가하고 극한하중의 부재 강성을 사용한 시스템의 거동과 비교하였다. 또한 연결보의 다양한 배근 및 보 춤에 따른 시스템의 거동특성을 비교, 분석하였다.

핵심용어 : 유효강성, 연결보, 성능기반설계, 병렬전단벽, 확률분포