

## 비대칭 벽식구조의 최적 비틀림 설계 An optimized torsional design of asymmetric wall structures

조봉호\*  
Cho, Bong-Ho

홍성걸\*\*  
Hong, Sung-Gul

### ABSTRACT

This paper develops an optimized torsional design method of asymmetric wall structures considering deformation capacities of walls. Contrary to the current torsional provisions, a deformation based torsional design is based on the assumption that stiffness and strength are dependent. Current torsional provisions specify two design eccentricity of stiffness to calculate the design forces of members. But such a methodology leads to an excessive over-strength of some members and an optimal torsional behavior is not ensured. Deformation-based torsional design uses displacement and rotation angle as design parameters and calculates base shear for inelastic torsional response directly. Because optimal torsional behavior can be defined based on the deformation of members, deformation based torsional design procedure can be applied to the optimal and performance-based torsional design. To consider the effect of accidental eccentricity, an over-strength factor is defined. The over-strength factor is determined from performance level, torsional resistance and arrangement of walls

### 1. 서론

비대칭 평면을 갖는 구조물이 지진에 대해 취약한 거동을 보인다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 대부분의 내진설계 기준들은 비틀림 응답에 의한 일부 부재의 과도한 연성도 요구량을 제한하기 위하여 비틀림 설계 규정을 두고 있다. 최적 비틀림 설계와 성능기초 내진설계의 관점에서 볼 때 이러한 기존의 비틀림 설계법은 두 가지 한계를 갖는다. 1) 기존의 비틀림 설계법은 탄성 강성에 근거하여 비틀림 설계를 수행하므로 비탄성 비틀림 응답을 적절히 고려할 수 없다. 비탄성 응답이 예상되는 비대칭 시스템의 경우 각 횡저항 부재의 변형 능력이 설계에 반영되지 않으며, 따라서 비탄성 변형을 고려한 성능기초 설계를 효과적으로 수행하기 어렵다. 2) 비대칭 시스템의 최적 비틀림 응답을 나타내는 각 부재의 강도비는 단 하나 존재한다. 기존의 비틀림 설계법은 강성 편심의 부호에 따라 비대칭 시스템을 강측과 약측으로 구분하여 두 개의 설계 편심을 적용하고 이로부터 계산되는 설계 하중 중 불리한 값을 최종 설계 하중으로 결정하므로 결과적으로 일부 부재의 과도한 초과 강도로 인해 최적의 비틀림 응답을 얻기 어렵다. 기존의 비틀림 설계법과 달리 최적의 비틀림 응답을 설계자가 직접 선택하고 이에 요구되는 설계하중을 구할 수 있는 방법이 저자에 의해 제안된 비대칭 벽식 구조의 변형에 기초한 비틀림 설계법이다.[1,2] 변형에 기초한 비틀림 설계법은 각 횡저항 부재의 변형능력을 고려하여 강도비와 시스템 밀면 전단력을 결정한다. 기존의 비틀림 설계법이 두 개의 설계 강성편심을 사용하는 데 비해 변형에 기초한 비틀림 설계법은 단일한 강도편심을 적용하여 최적 비틀림 응답에 요구되는 설계 하중을 계산하고 우발편심의 효과를 고려하기 위하여 초과 강도 계수를 이용한다. 표 1은 두 가지 비틀림 설계법의 특징을 비교하여 나타낸다.

\* 서울대학교 건축학과 박사과정, 학생회원

\*\* 서울대학교 건축학과 조교수, 정회원

표 1 현행 비틀림 설계법과 변형에 기초한 비틀림 설계법의 특징

	현행 비틀림 설계법	변형에 기초한 비틀림 설계법
설계 가정	주기(강성), 연성도(반응수정계수) 밀면 전단력(설계 하중)	연성도, 변위, 비틀림 회전각
설계 결과	강도비, 변위, 비틀림 회전각	강성(주기), 강도비, 밀면 전단력(설계 하중)
설계 목적	비틀림 효과의 최소화	의도한 비틀림 미케니즘 발휘
설계 방법	두 개의 설계 강성 편심 적용	한 개의 설계 강도 편심 적용

## 2. 변형에 기초한 비틀림 설계법

### 2.1 기본 가정

기존의 내진설계법은 벽체의 탄성 강성은 벽체의 크기에 의해서만 결정된다는 가정에 근거하여 비틀림 설계를 수행한다. 부재의 모멘트-곡률 관계를 이선형 관계로 이상화할 때 그림 1(a)와 같이 동일한 단면의 강도가 다른 세 개의 벽체는 동일한 강성을 갖고 항복곡률은 강도에 비례한다는 것이 기존 설계방법의

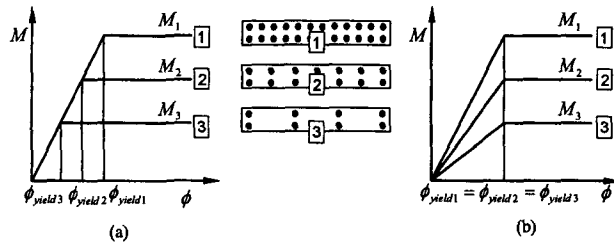


그림 1 캔틸레버 벽체의 강성- 강도 관계 (a) 동일 강도 가정 (b) 동일 항복 곡률 가정 [ 3,4]

가정이다. 그러나 실제로 동일한 단면을 갖는 단면의 벽체는 축력이나 철근비의 변화에 의해 강도가 변할 경우 그림 1(b)와 같이 강성은 강도에 의해 결정된다.[3] 따라서 변형에 기초한 비틀림 설계법은 벽체의 강도를 결정하기 이전에 벽체가 갖는 고유 특성은 강성이 아닌 항복곡률(혹은 항복변위)로 가정한다. 즉 벽체의 강성은 강도를 항복 변위로 나눈 값으로 계산하며 각 벽체의 강도를 결정하기 이전에는 벽체의 강도를 알 수 없는 것으로 가정한다. 강성을 알 수 없으므로 설계 하중은 비틀림 응답을 고려하여 설계의 마지막 단계에서 결정한다.

### 2.2 변형에 기초한 비틀림 설계법

변형에 기초한 비틀림 설계는 그림 2 와 같이 요약할 수 있다. 대상 비대칭 시스템의 벽체의 길이가 결정되면 각 벽체의 항복 변위와 설계 변위가 결정된다. 설계의 초기 단계에서 각 벽체의 강도 및 강성은

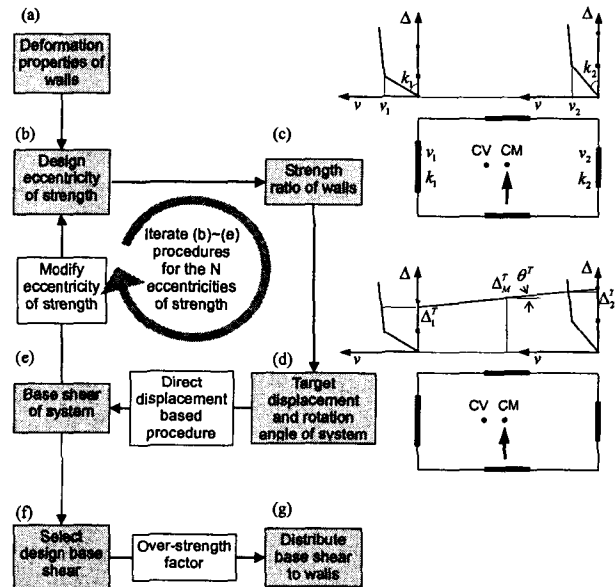


그림 2 변형에 기초한 비틀림 설계

알 수 없다. 비틀림 설계를 수행하기 위해서는 각 벽체의 강도 및 강성을 결정해야 하므로 설계 강도 편심을 설정하면 이를 만족하는 각 벽체의 강도비와 등가 강성을 결정할 수 있다. 각 벽체의 강도비는 강도 편심비로부터 (c)와 같이 결정된다. 강도비와 등가 강성이 결정되면 시스템의 목적 설계 변위와 그 때의 비틀림 회전각을 알 수 있다. 직접 변위 설계법[4]의 설계 방법을 이용하면 목적 설계 변위와 비틀림 회전각에 대해 시스템에 요구되는 밀면 전단력을 계산할 수 있다. (e)에서 결정되는 밀면전단력은 (b)에서 설정한 강도 편심비와 (c)에서 결정한 강도비 및 등가 강성, 그리고 (d)에서 결정된 목적설계 변위 및 비틀림 회전각에 대해 요구되는 시스템의 설계하중이라 볼 수 있다. 그림 2(b)~(e)의 과정을  $N$  개의 강도 편심비에 대해 반복 수행하면  $N$  개의 밀면 전단력을 구할 수 있다. 이 중 최적의 비틀림 응답을 나타내는 강도 편심비에 대한 밀면 전단력을 선택한다. 여기서 최적의 비틀림 응답은 각 횡저항 부재가 변형 능력을 가장 크게 발휘하는 응답으로 정의할 수 있다. 일반적으로 최대의 변형 능력을 발휘할 때 가장 작은 밀면 전단력을 요구한다. 우발 편심의 효과를 고려하여 초과강도 계수를 선택된 밀면 전단력에 곱하면 최종적으로 설계 하중을 얻을 수 있으며 결정된 설계 하중을 강도비에 따라 각 벽체에 분배하면 각 벽체의 최종 설계하중을 얻을 수 있다.

### 3. 설계 모델과 설계 변수

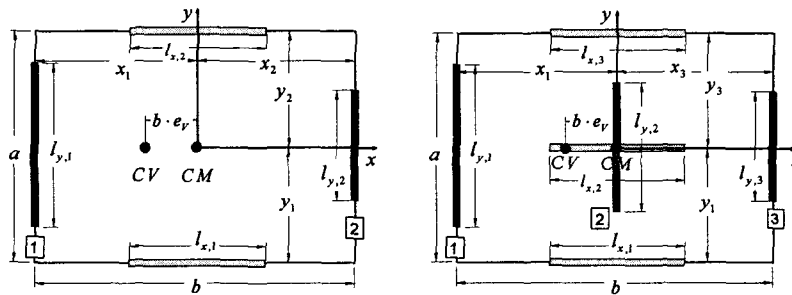


그림 3 비대칭 설계 모델 (a) 2-요소 설계 모델 (b) 3-요소 설계 모델

변형에 기초한 비틀림 설계법을 최적 비틀림 설계에 적용하기 위해 지진방향 벽체의 개수에 따라 그림 3 과 같은 2-요소 모델과 3-요소 모델을 사용하였다. 설계 모델은 단층 구조물로 질량 중심은 평면 중심과 일치하며  $y$  방향 벽체들이 비대칭형으로 분포된 비대칭 벽식 구조이다.  $x$  방향 벽체들은 완전 대칭형 분포를 나타내며,  $y$  방향의 지진하중만을 고려한다. 변형에 기초한 비틀림 설계에서 비틀림 응답에 영향을 미치는 변수들은 구조 시스템의 평면 형상, 목적 강도 편심, 벽식구조의 기하학적 비대칭, 직각 방향 벽체의 영향 등이 있다. 이러한 설계 변수들의 영향을 분석하기 위하여 평면의 면적과 양 방향 벽체 길이의 합이 동일하도록 하고 네 가지 설계 변수를 적용하였다.

1) 벽식 구조 시스템의 형상비  $\lambda$  는 양 방향 시스템 너비의 비  $b/a$  로 정의한다. 각 벽체는 평면의 끝단에 위치하도록 가정한다. 따라서  $\lambda$  는 전체 시스템의 비틀림 저항 능력을 결정하는 변수이다. 즉 벽체들의 강성이 동일하다면  $\lambda$  가 커지면  $y$  방향 강성은 변하지 않지만,  $x$  방향 벽체들의 비틀림 강성에 대한 기여도는 작아진다. 이 때  $y$  방향 벽체들의 비틀림 강성에 대한 기여도는 커지지만  $y$  방향 벽체들이 항복한 이후에는 그 기여도가 미미하므로  $\lambda$  가 커질수록 시스템의 비틀림 저항 능력은 작아진다고 볼 수 있다.

2) 벽체 길이 계수로 2-요소 모델에 대해서는  $\alpha$ , 3-요소 모델에 대해서는  $\alpha_1$  과  $\alpha_2$  를 정의하였다.  $y$  방향 벽체와  $x$  방향 벽체는 동일한 벽체 두께를 가지면서 각 방향 벽체 면적의 합은

동일하다.  $x$  방향 벽체들은 각각  $l_0$ 로 동일한 길이를 가지며  $y$  방향 벽체들은 벽체 길이의 합은 변하지 않으면서 형태상의 시스템 비대칭성을 고려할 수 있도록 2-요소 모델의 경우 각각  $l_{y,1} = l_0(1+\alpha)$  와  $l_{y,2} = l_0(1-\alpha)$  로 정의하였다. 3-요소 모델에 대해서는  $y$  방향 벽체들의 길이를 각각  $l_{y,1} = l_0(1+\alpha_1)$ ,  $l_{y,2} = l_0(1-\alpha_1-\alpha_2)$ ,  $l_{y,3} = l_0(1+\alpha_2)$  로 정의하였다

3)  $x$  방향 벽체의 강도 및 강성을 고려하기 위해서  $\gamma$  를 정의하였다.  $\gamma$  는  $x$  방향 밀면 전단력과  $y$  방향 밀면 전단력의 비로  $x$  방향 벽체들의 비틀림 응답에 대한 영향을 반영하는 설계 변수이다.  $\gamma$  가 클수록  $x$  방향 벽체들의 비틀림 강성에 대한 기여도가 커지므로,  $\lambda$  와 마찬가지로  $\gamma$  역시 시스템의 비틀림 저항 능력을 결정하는 변수이다.

4) 변형에 기초한 비틀림 설계법은 각 벽체의 성능 수준에 따른 변형 능력을 고려한다. 성능 수준 계수  $c_{PL}$  은 각 벽체의 성능수준에 따른 변형 능력을 나타내는 변수로  $c_{PL}$  이 0 인 경우는 완전 탄성 응답을,  $c_{PL}$  이 1 인 경우는 파괴 직전의 응답을 나타낸다. 본 논문은  $c_{PL}$  이 0.3 인 경우와 0.8 인 경우를 각각 사용성 수준과 붕괴방지 수준의 성능수준 계수로 정의한다.

일반적으로 정규강성회전반경  $\rho_k$  는 시스템의 비틀림 저항 능력을 나타낸다. 본 논문은  $\rho_k$  대신 비탄성 비틀림 응답과 관련된 지표로써  $\rho_v$  를 식 (1)과 같이 정의한다. 강성회전반경이 탄성 시스템에 대한 비틀림 저항능력을 나타내는 지표임에 비해 강도회전반경은 모든 벽체가 항복했을 때 횡저항에 대한 비틀림 저항 능력을 나타낸다.

$$\rho_v = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\sum_i v_i (x_i - x_v)^2 + \sum_i v_i (y_i - y_v)^2}{\sum_i v_i}} \quad (1)$$

#### 4. 비틀림 미케니즘과 최적 비틀림 응답

##### 4.1 변위-회전각-밀면 전단력 관계

그림 3 의 설계 모델과 설계 변수에 대하여 2 장의 변형에 기초한 비틀림 설계법을 적용하면 변위-회전각과 소요 밀면 전단력의 관계를 구할 수 있다.

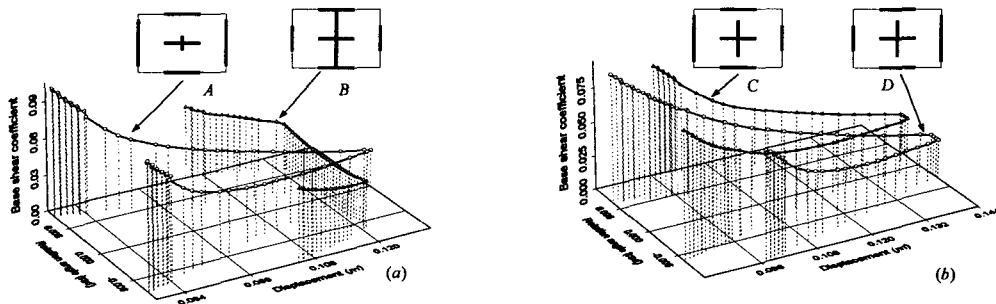


그림 4 3-요소 모델의 변위-회전각-밀면 전단력 관계

그림 4 와 그림 5 는 각각 3-요소 모델과 2-요소 모델의 설계 결과를 나타낸다. 3-요소 모델과 2-요소 모델 모두 최대 변위를 발휘할 때 최소 밀면전단력을 요구하는 것을 볼 수 있다. 밀면 전단력이 최소가 될때를 최적의 비틀림 응답이라고 정의한다면, 이때의 비틀림 회전각은 벽체 길이 계수  $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$  및 비틀림 저항능력과 관련된 설계 변수인  $\lambda$  와  $\gamma$  에 의해서 결정되는 것을 볼 수 있다. 특히 그림 4 의 3-요소 모델의 비틀림 응답은 벽체의 배치에 따라 크게 변하며, 중앙부에 가장 긴 벽체가 존재하는 모델 A 의 경우, 최적 비틀림 응답을 명확히 정의하기 어렵다. 이는 설계 강도 편심이 변하더라도 중앙부 벽체에 의해 설계 변위가 결정되므로 시스템 전체의 변위 및 소요 밀면전단력은 크게 변하지 않는 것으로 설명할 수 있다.

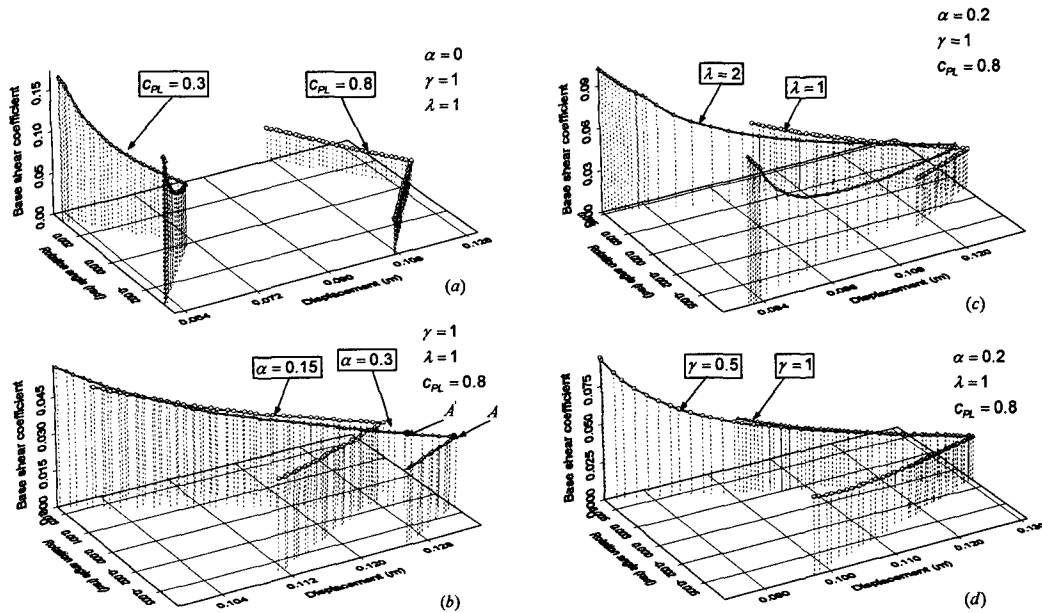


그림 5 2-요소 모델의 변위-회전각-밀면 전단력 관계

#### 4.2 최적의 비틀림 응답을 위한 강도 분배

비틀림 설계에 있어 가장 핵심적인 쟁점은 최적의 비틀림 응답을 얻기 위하여 어떻게 각 횡저항 부재의 강도를 어떻게 결정할 것인가 하는 점이다. 기존의 비틀림 설계에 대한 대부분의 연구들은 최적의 비틀림 응답을 강측과 약측의 변위 연성도가 비슷해지는 경우로 보았다. 즉 어느 특정 부재에 과도한 연성도 요구량이 발생하지 않도록 각 부재의 강도를 결정하는 것을 최적의 비틀림 설계로 간주하였다. 일반적인 경우 이러한 방법은 유효하지만 각 횡저항 부재의 최대 변형능력을 고려하는 변형에 기초한 비틀림 설계의 경우는 각 부재의 변형능력이 골고루 발휘되어 설계 하중이 가장 작아지는 경우를 최적의 비틀림 설계로 정의한다.

그림 6(a)는 2-요소 모델의  $\lambda$  와  $\gamma$  의 변화에 따른 최적의 비틀림 응답에 대한 강도편심비  $e_{V,cr}$  과 강성편심비  $e_{R,cr}$  을 나타낸다.  $\lambda$  와  $\gamma$  는 시스템의 비틀림 저항능력과 관련된 설계 변수로  $\lambda$  가 증가하고  $\gamma$  가 감소하면 시스템의 강성 및 강도 회전반경은 감소한다. 즉, 비틀림 저항능력이 작을수록 강도 편심은 0 에 가까워진다. 이는 반대로 기하학적 비대칭성을 갖는 구조물의 경우 비틀림 저항 능력이 클수록 일정정도의 강도 편심이 존재할 때 최적의 비틀림 응답을

나타낸다는 것을 의미한다.  $\lambda$ 와  $\gamma$ 를 강도 회전반경  $\rho_v$ 에 대해서 나타내면 비틀림 저항 능력과 최적의 비틀림 응답을 위한 강도 편심과의 관계를 보다 쉽게 나타낼 수 있다. 그림 6(b)는  $\lambda$ 가 1 부터 2 까지,  $\gamma$ 가 0.5 부터 1 까지 변할 때 강도회전반경에 대한 최적의 비틀림 응답을 위한 강도편심비와 강성편심비를 나타낸다. 주어진  $\lambda$ 와  $\gamma$ 의 범위 내에서 정규 강도 회전 반경  $\rho_v$ 는 0.54-0.71 사이에 존재하며,  $\rho_v$ 가 작은 경우에는 강도 중심이 질량 중심에 가까우며  $\rho_v$ 가 큰 경우에는 강도 중심이 강성 중심과 질량 중심의 중간 부분에 위치한다. 따라서 최적의 비틀림 응답을 나타내는 강도편심비는 벽체의 기하학적 비대칭성을 나타내는  $\alpha$ 와 비틀림 저항능력을 나타내는  $\lambda$  및  $\gamma$ 를 동시에 고려하여 결정해야 하며 비틀림 저항 능력이 작은 시스템의 경우, 강도 중심이 질량 중심에 가깝도록 설계하는 것이 바람직하다.

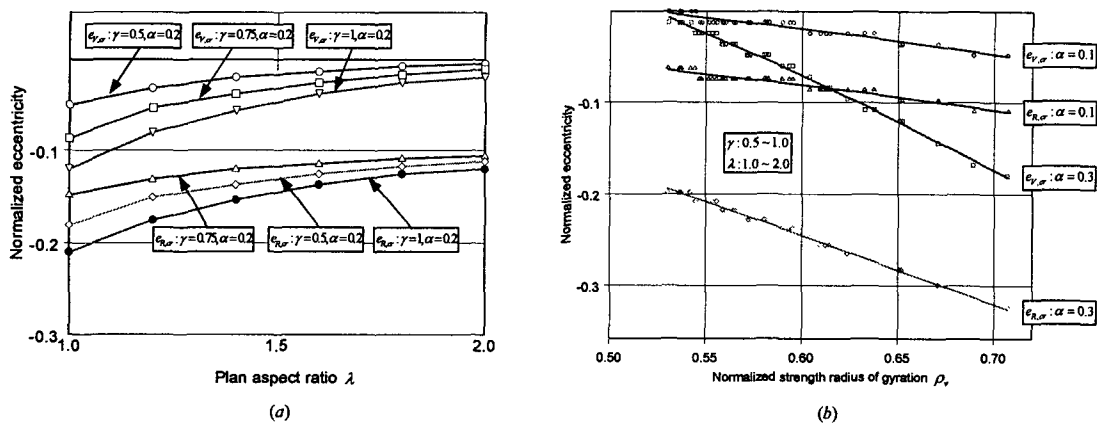


그림 6-2-요소 모델의 최적의 비틀림 응답을 위한 강도 편심

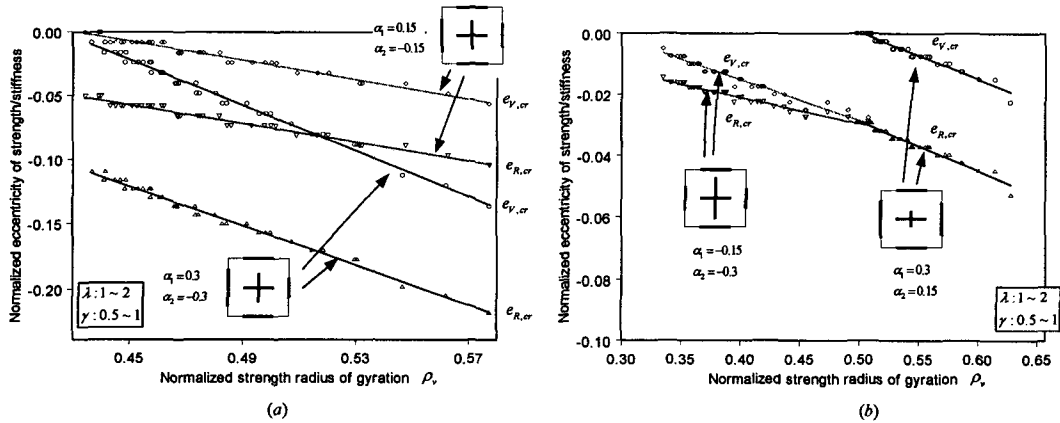


그림 7-3-요소 모델의 최적의 비틀림 위한 강성, 강도 편심

그림 7은 3 요소 모델의 최적 비틀림 응답을 위한 강도편심과 강성 편심을 나타낸다. 3-요소 모델의 경우는 2-요소 모델과는 달리 벽체의 배치에 따라 기하학적 비대칭 특성이 결정된다. 그림 7(a)는 길이가 가장 긴 벽체가 한쪽 단부에 배치된 경우를 나타내며, 그림 7(b)는 중앙부에 길이가 가장 긴 벽체가 배치되거나 가장 짧은 벽체가 배치된 경우를 나타낸다.  $\lambda$ 와  $\gamma$ 가

동일하더라도 각 유형별로 발휘하는  $\rho_v$ 의 영역이 다르며 모든 경우에 대해서  $\rho_v$ 가 작을수록 강도편심과 강성 편심은 작아지고 강도편심은 0에 가까워진다.

## 5. 초과 강도 계수

### 5.1 초과 강도 계수의 정의

우발 편심의 효과를 고려한다면 최적의 비틀림 응답에 대한 밀면 전단력에 적절한 초과강도 계수를 고려해야 한다. 본 논문은 초과강도 계수를 그림 8 과 같이 정의하기로 한다. 시스템에 발생 가능한 우발 편심을  $e_{R,cr}$ 에 더한 값과 뺀 값에 대한 밀면 전단력을 계산한 후 그 중 큰 값을 우발 편심에 대해 요구되는 시스템 밀면 전단력으로 정의하기로 한다. 기존의 비틀림 설계법에서 일반적으로 사용되는 5%의 우발 강성 편심을 적용하면 식 (2)의 5% 우발 편심에 대한 밀면 전단력과 식(3)의 초과 강도 계수를 정의할 수 있다.

$$(V_B)_O = \max((V_B)_{0.05}, (V_B)_{-0.05}) \quad (3)$$

$$O_s = (V_B)_O / (V_B)_{cr} \quad (4)$$

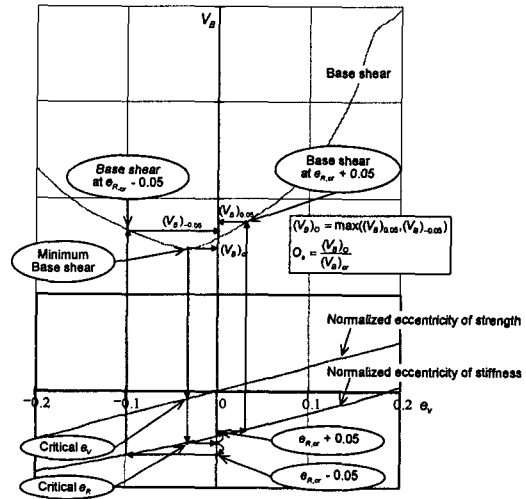
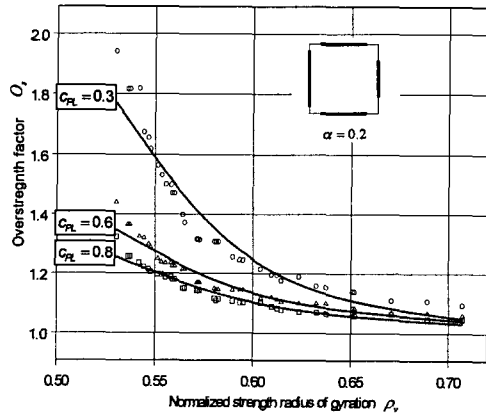
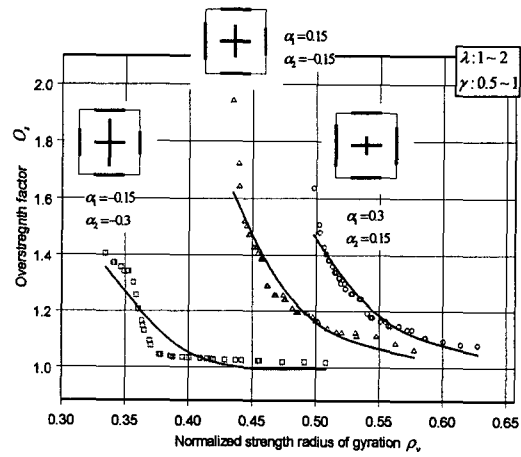


그림 8 초과 강도 계수의 정의



(a)



(b)

그림 9 2-요소 모델과 3-요소 모델의 초과 강도 계수

그림 9 는 2 요소 모델과 3 요소 모델의  $\rho_s$ 에 대한 초과강도 계수의 관계를 나타낸다. 모든 경우에 대해서 비틀림 저항능력이 작을수록( $\rho_s$ 가 작을수록) 더 큰 초과강도계수를 요구한다. 그림 9(a)는 2-요소 모델의 성능수준계수  $c_{PL}$ 에 대한 초과강도 계수를 나타낸다.  $c_{PL}$ 이 작을수록(최대 응답이 탄성 영역에 가까울수록) 더 큰 초과강도 계수를 요구함을 볼 수 있다. 그림 9(b)는

붕괴방지 성능수준( $c_{PL} = 0.8$ )에 대한 3-요소 모델의 초과 강도 계수를 나타낸다. 중앙부 벽체의 길이가 가장 큰 시스템의 경우가  $\rho_v$ 는 가장 작음에도 가장 큰 초과강도 계수를 요구한다. 이는 강도 편심비가  $e_{v,cr}$ 에서 약간 변하더라도 시스템 설계 변위의 변화는 미미하며 따라서 밀면 전단력 역시 크게 증가하지 않는 것으로 설명할 수 있다. 최적의 비틀림 응답을 나타내는 강도 편심비와 마찬가지로 초과 강도 계수 역시 기하학적 비대칭 형상과  $\rho_v$ 로부터 결정된다.

## 6. 결론

1) 기존의 비틀림 설계법이 두 개의 강성 편심에 대해 비틀림 설계법을 수행하는 데 비해 변형에 기초한 비틀림 설계법은 단일한 강도 편심에 대해 비틀림 설계를 수행한다. 최적의 비틀림 응답을 나타내는 강도 편심을 찾기 위해 반복 계산을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 변형에 기초한 비틀림 설계법은 우발 편심의 효과를 고려하기 위하여 단일 강도편심에 대한 최적 밀면전단력에 초과강도 계수를 곱하여 설계하중을 계산한다.

2) 각 벽체의 연성도와 관련된 성능수준계수  $c_{PL}$ , 각 벽체의 형태를 결정짓는 벽체 길이 계수  $\alpha_1, \alpha_2$ , 직각 방향 부재의 영향을 고려하는  $\gamma$ , 비틀림 저항능력과 관련된 시스템 형상비  $\lambda$  등을 고려하여 비대칭 벽식구조의 변위-회전각-밀면 전단력 요구량의 관계를 구하였다.

3) 비대칭 시스템의 변위가 최대가 되는 비틀림 응답을 최적의 비틀림 응답으로 정의하였다. 개별 벽체들이 최대한의 변형능력을 발휘할 때 시스템 변위가 최대가 되며 이때 소요 밀면 전단력은 최소가 된다. 변형에 기초한 비틀림 설계법은 시스템 변위와 회전각 및 밀면 전단력의 응답 관계를 직접 고려할 수 있으므로 설계자가 의도하는 비틀림 미케니즘을 만족하는 각 벽체의 강도를 계산할 수 있다.

4) 최적의 비틀림 응답을 나타낼 때 횡저항 부재들의 강도 중심은 강성 중심과 질량 중심 사이에 존재한다. 단 비틀림 저항이 큰 시스템의 경우는 강성중심과 질량 중심의 중간부분에 위치하며 비틀림 저항이 작은 시스템의 경우는 질량중심쪽에 더 가깝게 위치한다. 최적의 비틀림 응답을 위한 강도편심과 우발편심의 효과를 고려하기 위한 초과 강도 계수는 성능 수준, 비틀림 저항능력, 벽체 배치의 유형 등에 의해 결정된다.

## 감사의 글

본 논문은 한국 과학재단의 특정 목적 기초 연구(1999-1-310-002-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다

## REFERENCES

1. Cho Bong-ho, Hong Sung-gul, "Displacement Based Seismic Design of Aymmetric-Plan buildings," *KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001, pp 361-370
2. 홍성걸, 조봉호 "변형에 기초한 비대칭 벽식구조의 내진설계" *한국지진공학회 논문집*, 제 6권 제 1호, 2002
3. Priestley, M. J. N. and M. J. Kowalsky, "Aspects of Drift and Ductility Capacity of Rectangular Cantilever Structural Walls," *Bulletin, New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 31, 1998, pp.73-85
4. Priestley, M. J. N. and M. J. Kowalsky, "Direct Displacement-Based Seismic Design of Concrete Buildings," *Bulletin, New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 33, 2000, pp.421-444