

변형에 기초한 비대칭 벽식 구조의 내진설계

Deformation Based Seismic Design of Asymmetric Wall Structures

홍성걸* 조봉호**
Hong, Sung Gul Cho, Bong Ho

국문요약

기존의 비틀림 설계법은 구조 벽체의 강성은 강도에 무관하게 결정된다는 기본 가정하에 강성을 설계 변수로 비대칭 벽식 구조의 비틀림 효과를 최소화 하기 위한 각 부재의 강도를 결정한다. 이와는 달리 최근의 연구에 의하면 구조 벽체의 강성과 강도는 상호 연관성을 갖는 것으로 알려졌다. 이 경우 벽체의 실제 강성은 비틀림 설계를 모두 마친 후에야 결정되므로 강성에 기초하여 비틀림 설계를 수행한다는 것은 모순이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 강성이 아닌 변형에 기초한 비대칭 벽식 구조의 비틀림 설계법을 제안한다. 기존의 비틀림 설계법은 탄성 비틀림 응답과 반응수정계수를 이용하여 비탄성 응답에 대한 설계 하중을 간접적으로 계산하지만 변형에 기초한 비틀림 설계법은 변위와 비틀림 회전각을 설계 변수로 비탄성 응답에 대한 설계 하중을 직접적으로 계산한다. 기존의 비틀림 설계법이 비틀림 효과를 최소화 하는 것을 목적으로 하는 데 비하여, 변형에 기초한 비틀림 설계법은 내진역량설계법의 기본 개념에 의거하여 설계자가 의도한 비틀림 미커니즘을 발휘하는 데 그 목적을 둔다. 변위와 회전각은 비대칭 구조의 성능수준을 직접적으로 나타내는 성능 지표이므로 본 설계법은 성능기초 내진설계에 효과적으로 사용될 수 있다.

주요어 : 비틀림 미커니즘, 변형에 기초한 비틀림 설계, 구조 벽체, 동일 항복 곡률 가정, 성능에 기초한 내진 설계

ABSTRACT

Current torsional provisions focus on restricting torsional effect of asymmetric wall structures by proportioning strength of walls based on the traditional assumption that stiffness and strength are independent. Recent studies have pointed out that stiffness of structural wall is dependent on the strength. This implies that actual stiffness of walls can be determined only after torsional design is finished and current torsional provisions may result in significant errors. To overcome this shortcoming, this paper proposes deformation based torsional design for asymmetric wall structures. Contrary to the current torsional provisions, deformation-based torsional design uses displacement and rotation angle as design parameters and calculates base shear for inelastic torsional response directly. Main purpose of deformation based torsional design is not to restrict torsional response but to ensure intended torsional mechanism according to the capacity design concept. Because displacement and rotation angle can be used as performance criteria indicating performance level of asymmetric structures, this method can be applied to the performance based seismic design effectively.

Key words : torsional mechanism, deformation based torsional design, structural walls, constant yield curvature assumption, performance based seismic design

1. 서 론

비대칭 평면을 갖는 구조물이 지진에 대해 취약한 거동을 보인다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 대부분의 내진설계기준들(UBC 97⁽¹⁾, EC8⁽²⁾, NZS 4203⁽³⁾)은 비틀림 응답에 의한 일부 부재의 과도한 연성도 요구량을 제한하기 위해 비틀림 설계규정을 두고 있다. 내진설계기준의 비틀림 설계 규정의 주된 목적은 구조물의 비틀림 효과를 최소화하는 것이며 이를 위해 우발 편심을 고려한 확장 설계 편심을 적용하여 각 부재의 설계하중을 계산한다. 이러한 비틀림 설계법의 기본 특징은 구조시스템의 반응수정계수와 밀접한 관련이 이미 주어진다는 것과 비탄성 비틀림 응답을 탄성 비틀림 응답에 근거하여 예측한다는 점이다. 비대칭 구조의 비탄성 비틀림 응답에 영향을 미치는 변수들은 강성 편심, 비틀림 강성, 반응수정계수, 고유 주기, 직각 방향 부재의 유무

등이 있으며 이러한 변수들의 영향을 평가하고 최적의 설계 편심을 제안하기 위한 여러 연구들이 수행되었다.⁽⁴⁻⁶⁾ 그러나 성능기초 내진설계의 관점에서 보면 기존의 비틀림 설계법은 몇 가지 중요한 문제점을 내포하고 있다. 성능기초 내진설계의 가장 중요한 특징이 구조물이 의도한 바의 내진 성능을 발휘하도록 설계하는 것이라고 할 때, 기존의 비틀림 설계법은 이러한 설계 의도를 반영하는 데 있어 다음과 같은 한계를 갖는다.

- 1) 비대칭 구조물에서 변위와 비틀림 회전각은 중요한 변형 특성으로 기존의 비틀림 설계법은 이러한 변형 특성을 설계의 변수가 아닌 결과로써 계산한다. 즉 변형능력을 반응수정계수를 통해 미리 가정하고 설계하는 방법을 비틀림 변형 특성이 주요 성능 기준인 비대칭 시스템의 성능기초 내진설계에 적용하기는 어렵다.
- 2) 탄성 비틀림 응답은 횡방향 강성과 비틀림 강성 및 강성 편심에 의해 결정된다. 길이가 다른 벽체들로 구성된 벽식 구조와 같이 횡저항 부재가 동시에 항복하지 않고 일부 부재만 먼저 항복하는 경우 비탄성 영역에서의 구조

* 정회원 · 서울대학교 건축학과, 조교수(대표저자 : sglhong@snu.ac.kr)

** 학생회원 · 서울대학교 건축학과, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 12. 14 / 심사종료일 : 2002. 1. 23)

- 물의 강성특성은 탄성영역에서의 강성특성과 달라진다. 따라서 비탄성 비틀림 응답을 탄성 비틀림 응답과 반응 수정계수를 이용하여 예측하는 것은 합리적이지 못하다.
- 3) 기존의 비틀림 설계법은 우발 설계 편심을 이용하여 각 횡저항 부재가 균일한 위험도(uniform risk)를 갖도록 설계한다. 이는 결과적으로 횡저항 부재의 초과강도를 초래하며 Chandler등⁽⁴⁾의 연구에 따르면 비틀림 강성이 작은 시스템의 경우 초과강도를 1.8배까지 요구한다. 성능기초 설계법의 주요 개념중 하나인 내진역량설계법(capacity design)⁽⁷⁾의 관점에서 보면, 각 부재가 균일한 위험도를 갖는 것 보다는 설계자의 의도대로 특정 부재에 비탄성 변형이 집중되거나, 혹은 의도한 비틀림 미케니즘이 발생하도록 설계하는 것이 더 경제적이고 바람직하다.
- 4) Priestley 등^{(6),(9)}의 최근의 연구에 의하면 구조 벽체의 강성과 강도는 상호 연관성을 갖는다. 이 경우 벽체의 실제 강성은 비틀림 설계를 모두 마친 후에야 결정되므로 기존의 비틀림 설계법과 같이 강성에 기초하여 비틀림 설계를 수행한다는 것은 모순이다.

이와 같은 이유로 비틀림 거동이 예상되는 비대칭 벽식 시스템에 성능기초 내진설계를 적용하기 위해서는 새로운 개념의 비틀림 설계법이 필요하며 이와 관련하여 기존의 비틀림 연구와 구별되는 몇몇 연구들이 수행되었다.

Paulay^{(10),(11)}는 비틀림 미케니즘을 고려하여 비대칭 시스템의 연성도 요구량을 계산하는 방법을 제안하였다. 그는 직각방향 부재의 유무에 따라 비대칭 구조물을 비틀림에 대해 구속된 시스템과 구속되지 않은 시스템으로 구분하여, 각 시스템의 비틀림 미케니즘을 반영하였다. 비틀림에 대해 구속된 시스템의 경우, 극한상태에서 직각방향 부재들만이 비틀림에 저항하는 것으로 보고 회전각 및 연성도 요구량을 계산하였다. 그러나 Paulay의 연구에서 중요한 개념인 비틀림 구속 정도(torsional restraint)는 실제 구조물에서는 명확히 구분하기 어려운 단점이 있다. 또한 실제 설계에 적용하기 위해서는 시스템의 연성도 요구량에 근거한 반응수정계수를 이용하는 하중 기초 설계법(force-based design)에 적용해야 하지만, 이는 앞에서 언급한 기존 비틀림 설계법의 단점들을 완전히 극복하지 못하며, 변위 기초 설계법(displacement-based design)에 적용하기 위한 구체적인 적용방법은 제시하지 못하였다.

Tso와 Smith⁽⁵⁾는 벽체의 강성과 강도가 상호 연관성을 갖는 경우와 갖지 않는 경우를 각각 K형과 D형으로 구분하여(그림 1의 (a)와 (b)) 기존의 비틀림 설계기준에 따라 설계된 비대칭 구조물을 평가하였다. 연성측(flexible side)의 K형 부재는 강도를 증가시킬 경우 항복변위가 증가하여 연성도 요구량이 감소하지만, D형 부재는 강도를 증가시킬 경우 강성의 증가로 설계 편심이 줄어들어 시스템의 비틀림 거동이 감소한다. 그러나 비틀림 설계 이전 구조물의 강성특성은 이미 결정되었다고 가정했기 때문에 강성이 강도에 영향을 받는 D형 부재의 실제 거동을 정확히 반영하지는 못하였다.

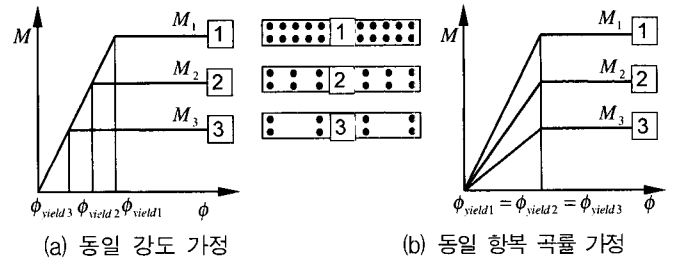


그림 1 길이가 같은 캔틸레버 벽체의 강성-강도 관계^{(5),(10)}

Priestley와 Kowalsky⁽⁸⁾는 비틀림 효과를 고려하지 않고 철근콘크리트 골조 및 벽식구조에 대한 직접 변위 설계법(direct-displacement-based design)을 제안하였다. 이 방법에 따르면 변위는 설계의 초기 단계부터 주요 설계변수로 사용되며, 밀면전단력(설계하중)은 설계의 결과로써 구해진다. 이 방법은 다자유도 시스템을 등가의 단자유도 비선형 시스템으로 변환하여 변위스펙트럼으로부터 설계하중을 구하는 방법으로 반응수정계수를 사용하지 않고 구조물의 비탄성 변형특성을 직접 고려하는 설계방법이다. 현재 이 방법은 실제 설계에 응용되기 시작하는 초기 단계로 SEAOC bluebook⁽¹²⁾의 부록에는 단순화된 직접 변위 설계법 및 설계 스펙트럼이 수록되어 있다.

본 논문은 직접변위 설계법의 주요 개념을 비대칭 벽식구조 시스템의 성능기초 내진설계에 적용하여 “변형에 기초한 비틀림 설계법”을 제안하고자 한다. 변위와 비틀림 회전각을 설계 변수로 사용하여, 설계자가 의도한 성능목표를 만족시킬 수 있도록 시스템 및 부재의 설계하중을 계산한다. 기존의 비틀림 설계와 구별되는 가장 큰 특징은 표 1에서 보는 바와 같이 변위 및 회전각이 설계의 결과가 아닌 설계의 변수로써 사용된다는 점이다. 기존 설계법에서 강성과 밀면전단력은 이미 주어진 값이지만 변형에 기초한 설계법에서는 설계의 결과로써 계산된다. 기존의 비틀림 설계법이 비틀림 효과를 최소화 하는데 그 목적을 두는 데 비하여, 변형에 기초한 비틀림 설계법은 내진역량설계법의 기본 개념에 의거하여 설계자가 의도한 비틀림 미케니즘을 발휘하는 데 그 목적을 둔다.

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

2. 기본 가정

변형에 기초한 비틀림 설계법을 전개하는 데 있어 벽체의 강성 특성, 벽체의 변형모델, 비대칭 설계모델의 형태, 직각방향 부재의 강성 및 강도 등에 관련하여 다음과 같은 기본 가정을 사용하였다.

1) 첫 번째 가정은 벽체의 강성특성에 관한 가정이다. 기존의 비틀림설계법의 기본 가정은 벽체의 탄성 강성은 벽체의 크기에 의해서만 결정된다는 것이다. 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 가정이다. 그러나 Priestley와 Kowalsky^{(8),(9)}의 최근 연구에 따르면 그림 1(b)와 같이 동일한 단면을 갖는 단면의 벽체는 축력이나 철근비의 변화에 의해 강도가 변하더라도 일정한 항복곡률을 갖는다. 이는 강성이 강도에 비례한다는 것을 의미한다. 따라서 부재의 강도를 결정하기 이전에 부재가 갖는 고유 특성은 강성이 아닌 항복곡률(혹은 항복변위)라고 할 수 있으며, 이는 벽식 구조에 대한 변형에 기초한 비틀림 설계법에서 가장 중요한 가정이라 할 수 있다. 벽체의 항복곡률 ϕ_{yield} 은 벽체의 길이 l_w 및 주철근의 항복 변형률 ϵ_{yield} 을 이용해 식 (1)과 같이 결정한다.⁽⁸⁾

$$\phi_{yield} = (2\epsilon_{yield}) / l_w \quad (1)$$

2) 두 번째 가정은 벽체의 변형특성에 대한 가정이다. 변형에 기초한 설계법을 수행하기 위해서는 벽체의 항복 변위와 최대 변위 및 성능 수준별 설계 변위를 먼저 정의해야 한다. 휨 거동이 지배적인 세장한 벽체의 항복 변위와 극한 변위는 FEMA 273⁽¹⁵⁾, Priestley⁽⁷⁾ 및 Wallace⁽¹⁴⁾ 등이 사용한 소성힌지 회전각($\theta_{plastic}$)을 이용한 변형모델을 이용하여 정의하기로 한다. 식 (2)와 (3)은 지진하중을 높이 h_e 에 작용하는 집중하중으로 치환했을 때, h_e 에서의 항복변위 (Δ_{yield})와 극한 변위 ($\Delta_{ultimate}$)를 나타낸다.

$$\Delta_{yield} = \frac{\phi_{yield} h_e^2}{3} = \frac{2\epsilon_{yield} h_e^2}{3l_w} \quad (2)$$

$$\Delta_{ultimate} = \Delta_{yield} + \theta_{plastic}(h_e - l_p/2) \quad (3)$$

여기서 l_p 는 소성 힌지 영역의 길이를 나타내며, 철근비, 축력, 횡보강 철근의 유무 등에 의해 결정되는 소성힌지 회전각 $\theta_{plastic}$ 는 FEMA 273⁽¹⁵⁾에서 제안하는 값을 따르기로 한다.

성능 수준별 설계 변위는 SEAOC bluebook⁽¹¹⁾의 정의를 따라 따라 식 (4)와 같이 정의한다.

$$\Delta_{design} = \Delta_{yield} + c_{PL}\Delta_{plastic} \quad (4)$$

여기서, c_{PL} 은 의도하는 성능 목표에 따라 각각 완전 기능 수행(operational) 수준, 거주 가능(occupiable) 수준, 인명 보호(life safe) 수준, 붕괴 방지(near collapse) 수준에 대해 각각 0, 0.3, 0.6, 0.8 중의 하나를 선택한다.

3) 세 번째 가정은 비틀림 설계의 대상인 비대칭 벽식구조 모델에 대한 가정이다. 본 논문은 그림 2의 x 방향과 y 방

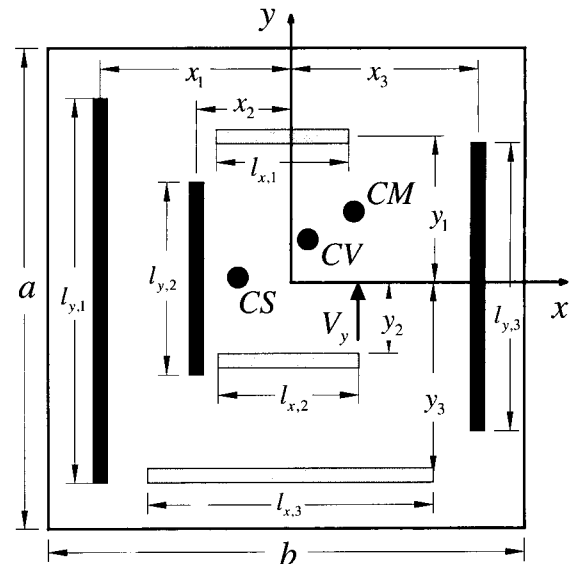


그림 2 비대칭 벽식 구조의 설계 모델

향에 각각 세 개의 구조벽체를 갖는 비대칭 시스템을 대상 모델로 한다. Y 방향으로 작용하는 지진하중 V_y 만을 고려하며, 각각의 벽체는 이선형 스프링으로 가정하고, 슬래브의 면내 강성은 무한한 것으로 본다. 벽체의 항복 이후 강성은 탄성강성의 5%로 가정한다. CM , CV , CS 는 각각 질량 중심, 강도 중심, 강성 중심을 나타내며 각각의 좌표는 (x_{CM}, y_{CM}) , (x_{CV}, y_{CV}) , (x_{CS}, y_{CS}) 으로 표현된다. x_j 와 $l_{y,i}$ 는 y 방향 벽체의 위치와 길이를 나타내며, 마찬가지로 y_j 와 $l_{x,i}$ 는 x 방향 벽체의 위치와 길이를 나타낸다. 본 논문에서 아래첨자 i 와 j 는 각각 y 방향 벽체와 x 방향 벽체의 번호를 나타낸다. 지진하중과 평행한 방향과 수직인 방향의 시스템 길이는 각각 a 와 b 로 나타내기로 한다.

4) 네 번째 가정은 각 벽체의 강성 및 강도를 정의하는 방식에 관한 가정이다. 첫 번째 가정에 의하면 각 벽체의 강도가 우선 결정되어야 강성을 구할 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 시스템의 밀면 전단력은 설계의 결과로써 계산되므로, 본 논문은 각 벽체의 강도비 및 이 강도비에 해당되는 가상 강성을 비틀림 설계법 전개를 위한 주요 설계 변수로 정의한다. 지진방향 벽체들의 강도비 $v_{y,i}$ 와 가상 강성 $k_{y,i}$ 는 식 (5), (6)과 같이 정의된다.

$$v_{y,i} = V_{y,i} / \sum_i V_{y,i} \quad (5)$$

$$k_{y,i} = v_{y,i} / \Delta_{yield,i} \quad (6)$$

여기서 $V_{y,i}$ 는 지진방향 벽체의 실제 강도를 나타낸다.

직각방향 부재의 강도 및 강성 역시 설계의 초기 단계에서는 알 수 없으므로 x 방향 밀면 전단력과 y 방향 밀면 전단력의 비를 식 (7)과 같이 γ 로 정의하면 $v_{y,i}$ 에 대응하는 직각방향 벽체의 강도비 $v_{x,j}$ 및 가상 강성 $k_{x,j}$ 은 식 (8), (9)로 정의할 수 있다.

$$\gamma = \sum_j V_{x,j} / \sum_i V_{y,i} \quad (7)$$

$$v_{x,j} = \gamma V_{x,j} / \sum_j V_{x,j} \quad (8)$$

$$k_{x,j} = v_{x,j} \Delta_{yield,i} \quad (9)$$

가정된 γ 값에 대하여 각 방향의 밀면 전단력을 계산하면 실제 γ 값을 알 수 있으며 수정된 γ 값에 대하여 다시 비틀림 설계를 수행한다. γ 값은 실제로 최소 설계하중의 결정에는 큰 영향을 미치지 않으므로 일반적인 경우에는 계산의 편의상 1로 가정하고 설계를 수행하기로 한다.

3. 변형에 기초한 비틀림 설계

변형에 기초한 비틀림 설계법은 그림 3과 같이 크게 (a)~(d)의 네 가지 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 각 개별 벽체의 항복변위와 극한 변위 및 성능 목표에 따른 성능 수준별 설계변위를 결정한다. 두 번째 단계에서는 강도 편심을 가정하여 이에 부합하는 개별 벽체의 강도비를 구하고, 이때의 시스템 목적 설계 변위 및 비틀림 회전각을 결정한다. 세 번째 단계에서는 직접 변위 설계법에 따라 비대칭 구조물을 등가의 단자유도 시스템으로 변환하여, 목적 설계 변위에 해당되는 밀면 전단력을 계산한다. 두 번째 단계와 세 번째 단계를 다중의 강도 편심비에 대해 반복 수행하여 다중의 목적설계변형에 대한 밀면 전단력을 계산한다. 네 번째 단계에서는 최종 설계 편심 및 설계 하중을 결정한다. 이 때, 설계 전단력을 최소로 하는 강도 편심을 선택했을 때 각 벽체의 변형능력이 최대한 발휘된다. 본 논문은 다중의 강도 편심에 대해 반복 계산을 수행하기 위하여 MathCad를 이용하였다.

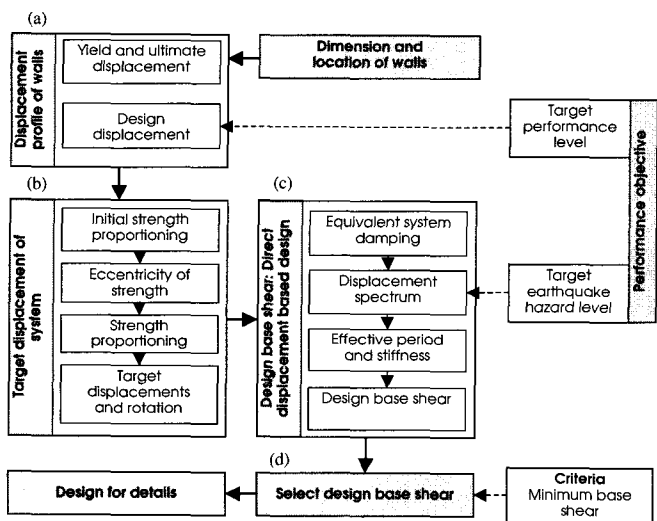


그림 3 변형에 기초한 비틀림 설계법에 의한 설계 과정

3.1 벽체의 변형 특성

변위는 가장 기본적인 설계 변수로 강성 및 강도를 결정

하기 이전에 벽체가 가진 기본 특성이다. 설계의 첫 번째 단계에서는 각 벽체의 항복변위와 극한변위 및 성능수준별 설계변위를 계산한다. 가정 2)의 식 (2)~(3)에 따라 각 벽체의 항복 변위 및 극한 변위를 계산한다. 각 벽체의 성능 수준별 설계변위는 식 (4)를 이용해 계산한다.

3.2 시스템의 목적 설계 변형

3.2.1 초기 강도비 가정

변위설계법의 주요 특징은 벽체의 강도 및 강성을 설계의 최종 단계에서 결정하는 것이므로, 비틀림 특성을 고려하여 설계하기 위해서는 강도의 초기값을 가정해야 한다. 실제 밀면 전단력을 알 수 없으므로, 가정 4)에서 정의한 강도비를 기준으로 설계방법을 전개한다. 벽체의 강도비를 길이 제곱에 비례하도록 하면 각 벽체는 유사한 철근비를 갖게 된다.^{(8),(10)} 따라서 식 (10)과 같이 지진방향 i 번째 벽체의 초기 강도비를 가정한다.

$$v_{y,i}^I = l_{y,i}^2 / \sum_j l_{y,i}^2 \quad (10)$$

이 때, 지진 방향 벽체들의 강도 중심은 식 (11)로 계산할 수 있다.

$$x_{CV}^I = \sum_j x_j v_{y,i}^I / \sum_j v_{y,i}^I \quad (11)$$

식 (11)로 계산한 강도 중심과 질량 중심이 일치하지 않을 때 식 (12)만큼의 강도 편심비가 존재한다.

$$e_V^I = (x_{CV}^I - x_{CM}) / b \quad (12)$$

마찬가지 방법으로 식 (8),(9)로부터 직각방향 j 번째 벽체의 강도비 $v_{x,j}$ 와 강도 중심을 식 (13), (14)와 같이 가정한다.

$$v_{x,j}^I = \gamma \cdot l_{x,j}^2 / \sum_j l_{x,j}^2 \quad (13)$$

$$y_{CV}^I = \sum_j y_j v_{x,j}^I / \sum_j v_{x,j}^I \quad (14)$$

3.2.2 목적 강도 편심 결정

식 (11)과 (13)의 강도비는 벽체의 변형특성 및 시스템의 비틀림 거동을 고려하지 않고 가정한 값들이다. 최적의 비틀림 응답을 얻기 위하여 식 (12)의 강도 편심을 수정하여 목적 강도 편심으로 설정하고 새로운 강도편심을 만족하는 각 벽체의 강도비를 결정한다. 최적의 비틀림 응답을 얻기 위한 목적 강도 편심은 여러 연구자들에 의해 제안되었으나 공통된 결론이 도출되지 않았으며, 다양한 변수들이 영향을 미친다.^{(4)-(6),(10)} 본 논문은 일정 범위 내의 강도 편심 영역을 설정하여 다중의 강도 편심에 대해 설계를 수행한 후 최종 단계에서 최적의 강도 편심을 선택하는 방법을 사용한다. 이를 위하여 목적 강도중심을 설정하고, 이를 만족하도록 강도비

를 수정한다. 질량중심을 기준으로 양쪽으로 a 만큼의 편심 거리만큼을 목적강도중심의 영역으로 가정하면, N 개의 목적 강도중심 $x_{CV,k}^T$ 을 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{CV,k}^T = \frac{2ab}{N-1}(k-1) + -ab \quad (15)$$

따라서 k 번째 목적 강도 중심에 대한 강도 편심비는 식 (16)과 같다.

$$e_{V,k}^T = (x_{CV,k}^T - x_{CM})/b \quad (16)$$

3.2.3 목적 강도비 결정

다음 단계에서는 식 (16)의 목적 강도 중심을 만족하도록 지진방향 부재들의 강도비를 다시 결정한다. 식 (17)~(38)의 수식들은 k 번째 목적 강도 중심 $x_{CV,k}^T$ 에 대응하는 강도비, 목적 설계 변위 및 설계 하중을 계산하는 과정에 사용된 식들로 편의상 아래 첨자 k 를 생략하기로 한다. 식 (11)의 초기 강도 중심을 식 (16)의 목적 강도 중심으로 변환하기 위해서는 식 (10)에서 가정한 강도비를 수정해야 한다. 이를 위해 각 벽체의 초기 강도에 더하거나 빼는 추가 강도 $v_{y,i}^C$ 를 벽체의 길이 제곱(l_i^2)과 목적 강도 중심과의 거리에 가중치를 두어 식 (17)과 같이 가정한다.

$$v_{y,i}^C = \begin{cases} p \frac{l_i^2}{\sum_i l_i^2} \frac{|x_i - x_{CV}^T|}{b} & (\text{when } x_i \leq x_{CV}^T) \\ q \frac{l_i^2}{\sum_i l_i^2} \frac{|x_i - x_{CV}^T|}{b} & (\text{when } x_i > x_{CV}^T) \end{cases} \quad (17)$$

여기서 p 와 q 는 부호가 다른 상수값으로, 식 (18)과 (19)에 대입하여 연립방정식을 풀어서 계산한다. 식 (18)은 평형조건을 나타내며, 식 (19)는 수정된 강도 중심이 x_{CV}^T 와 같아지도록 하는 조건이다.

$$\sum_i v_{y,i}^C = 0 \quad (18)$$

$$\sum_i x_i (v_{y,i}^I + v_{y,i}^C) = x_{CV}^T \quad (19)$$

따라서 최종적으로 결정된 지진방향 벽체들의 강도비는 식 (20)과 같이 구할 수 있다

$$v_{y,i}^T = v_{y,i}^I + v_{y,i}^C \quad (20)$$

그림 4는 강도 중심이 x_V^I 에서 x_V^T 로 변할 때 각 벽체의 강도비 및 강도 편심비의 변화를 나타낸다. 여기서는 1번 벽체의 강도비는 초기 강도비에 비하여 증가하며, 2번 벽체와 3번 벽체의 강도비는 감소한다. 이 때 강도비의 증감은 각 벽체의 위치와 길이를 고려하여 식 (17)에 의해 결정된 값이다. 결국 초기 강도비에 의한 강도편심 e_V^I 는 수정된 강도비에

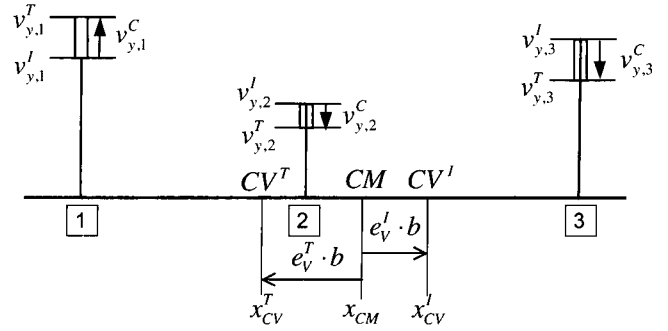


그림 4 목적 강도비의 결정

의해 e_V^T 로 바뀌며, 식 (6)에 의해 각 벽체의 가상 강성 역시 수정된다.

3.2.4 시스템 목적설계변위 및 비틀림 회전각 계산

식 (20)으로 결정된 지진 방향 벽체들의 강도비를 이용하여, 목적 설계변위 및 비틀림 회전각을 구한다. 횡저항 부재가 항복할 때마다 횡강성 및 비틀림 강성은 새롭게 계산된다. 그림 5의 A, B, C는 각각 1, 2, 3번 벽체가 항복할 때의 변위 및 회전각을 나타내고, 최종적으로 2번 벽체의 설계 변위에 의해서 시스템의 목적설계변위 및 비틀림 회전각이 결정되는 과정을 나타낸다. 매 단계마다 강성중심의 위치가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 벽체가 항복하여 시스템이 강성특성이 변하는 단계를 m 개의 단계로 나누면, m 번째 단계에서 목적 강도비에 해당되는 벽체의 가상 강성은 식 (21), (22)과 같이 계산한다.

$$(k_{y,i})_m = \begin{cases} v_{y,i}^T / \Delta_{yield,i} & (\text{when } (\Delta_i)_m \leq \Delta_{yield,i}) \\ 0.05 \cdot (v_{y,i}^T / \Delta_{yield,i}) & (\text{when } (\Delta_i)_m > \Delta_{yield,i}) \end{cases} \quad (21)$$

$$(k_{x,j})_m = \frac{v_{x,j}^I}{\Delta_{yield,j}} \quad (22)$$

m 번째 단계에서의 시스템의 가상 비틀림 강성은 식 (23)~(25)으로부터 계산할 수 있다.

$$(k_{torsion})_m = \sum_i (k_{y,i})_m (x_i - x_{CS})_m^2 + \sum_j (k_{x,j})_m (y_j - (y_{CS})_m)^2 \quad (23)$$

$$(x_{CS})_m = \sum_i x_i (k_{y,i})_m / \sum_i (k_{y,i})_m \quad (24)$$

$$(y_{CS})_m = \sum_j y_j (k_{x,j})_m / \sum_j (k_{x,j})_m \quad (25)$$

m 번째 단계에서의 각 벽체의 변위 변화량 $(\Delta_i)_m$ 은 질량중심에서의 변위변화량 $(\Delta_{CM})_m$ 과 비틀림 회전각 $(\theta)_m$ 을 이용하여 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$(\Delta_i)_m = (\Delta_{CM})_m + (\theta)_m (x_i - x_{CM}) \quad (26)$$

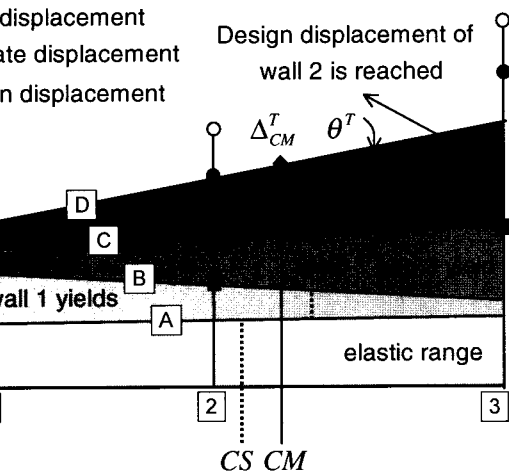
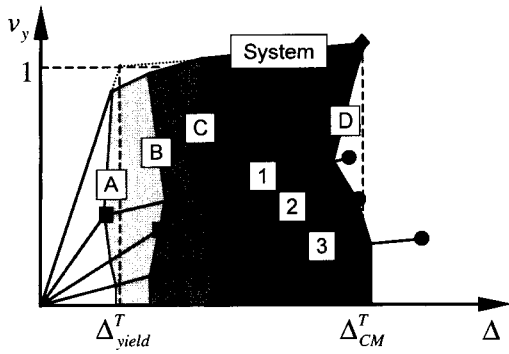


그림 5 목적 설계 변위 및 비틀림 회전각

여기서 비틀림 회전각 $(\theta)_m$ 식 (27)과 같이 계산한다.

$$(\theta)_m = \frac{\sum_i ((k_{y,i})_m (\Delta_{y,i})_m) \cdot (x_{CM} - (x_{CS})_m)}{(k_{torsion})_m} \quad (27)$$

식 (27)에서 $\sum_i ((k_{y,i})_m (\Delta_{y,i})_m)$ 은 m 번째 단계에서의 각 벽체의 강성과 변위 변화량의 곱으로 표현되는 하중변화량을 나타낸다. 식 (26)과 식 (27)을 연립하여 풀면 질량중심에서의 변위변화량 $(\Delta_{CM})_m$ 에 대한 각 벽체의 변위 변화량 및 시스템의 비틀림 회전각을 구할 수 있다.

각 벽체의 변위가 그림 5의 최종 목적설계변위 D 에 도달했을때 질량중심에서의 변위 및 총 비틀림 회전각은 식 (28), (29)와 같다.

$$\Delta_{CM}^T = \sum_m \Delta_{CM}^{m^{\text{th}}} \quad (28)$$

$$\theta^T = \sum_m \theta^{m^{\text{th}}} \quad (29)$$

이 때, 각 벽체의 최종 설계 변위는 식 (30)으로 계산된다.

$$\Delta_i^T = \Delta_{CM}^T + \theta^T (x_i - x_{CM}) \quad (30)$$

시스템의 항복 변위 Δ_{yield}^T 는 시스템의 강도-변위 곡선을 이선형으로 이상화하여 그림 5와 같이 정의한다. 따라서 전체 시스템의 변위 연성도는 식 (31)과 같다.

$$\mu_{sys} = \Delta_{CM}^T / \Delta_{yield}^T \quad (31)$$

3.3 설계 밀면 전단력

식 (28)과 (29)로 결정된 목적설계변위와 비틀림 회전각에 근거하여 Priestley와 Kowalsky⁽¹⁰⁾의 직접 변위 설계법을 이용해 설계하중을 계산한다.

3.3.1 등가 시스템 감쇠비

식 (30)에 의해 결정된 각 벽체의 목적 설계변위에 대한 변위 연성도 요구량은 식 (32)와 같다.

$$\mu_{\Delta,i} = \begin{cases} \Delta_i^T / \Delta_{yield,i} & (\text{when } \Delta_i^T \geq \Delta_{yield,i}) \\ 1 & (\text{when } \Delta_i^T < \Delta_{yield,i}) \end{cases} \quad (32)$$

이 때 각 벽체의 유효 감쇠비는 식 (33)⁽⁸⁾으로 계산된다. 이 값은 점성 감쇠비 및 이력 감쇠비를 함께 고려한 값이며, r 은 항복 이후의 강성계수로 여기서는 0.05를 사용하였다.

$$\xi_i = 0.05 + \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1-r}{\sqrt{\mu_{\Delta,i}}} - r\sqrt{\mu_{\Delta,i}} \right) \quad (33)$$

전체 시스템의 유효감쇠비는 식 (20)의 각 벽체의 강도비에 가중치를 두어 식 (34)와 같이 계산할 수 있다.

$$\xi_{eff} = \sum_i \xi_i v_{y,i}^T \quad (34)$$

이 값은 비대칭 시스템이 목적설계변위에 도달했을때의 시스템 유효 감쇠비를 나타낸다.

3.3.2 설계 변위 스펙트럼

식 (34)의 유효감쇠비로부터 비탄성 응답에 대한 변위-주기 관계의 설계 변위 스펙트럼을 구한다. 변위 스펙트럼은 실제 지진 데이터로부터 계산하거나 가속도 스펙트럼으로부터 변환하여 구할 수 있다. 5% 감쇠비에 대한 변위 스펙트럼을 유효감쇠비에 대한 변위 스펙트럼으로 변환하기 위해서는 적절한 감소계수를 이용해야 하며 식 (35)의 EC 8⁽³⁾에서 제안하는 식을 따르기로 한다.

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + 100\xi_{eff}}} \quad (35)$$

식 (35)의 감소계수를 이용하면 등가 유효 감쇠비에 대한 변위스펙트럼을 식 (36)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_d(T, \xi_{eff}) = \eta S_d(T, 0.05) \quad (36)$$

3.3.3 유효 주기 및 유효 강성

유효감쇠비에 대한 변위스펙트럼으로부터 목적설계변위

Δ_{CM}^T 에 대한 시스템의 유효 주기 T_{eff} 를 얻을 수 있다. 시스템의 유효 질량을 M_{eff} 라 하면, 목적설계변위에 대한 시스템의 등가 강성은 식 (37)과 같이 구해진다.

$$K_{eff} = 4\pi^2 M_{eff} / T_{eff}^2 \quad (37)$$

3.3.4 밀면 전단력

시스템에 요구되는 설계하중(밀면전단력)은 유효 강성과 목적설계변위의 곱으로 식 (38)과 같이 계산된다.

$$V_B = K_{eff} \Delta_{CM}^T \quad (38)$$

식 (38)로 계산되는 밀면 전단력은 식 (20)의 k 번째 강도 편심 $e_{V,k}^T$ 에 해당되는 값으로, N 개의 강도 편심에 대해 식 (17)~(38)의 과정을 반복 수행하여 N 개의 설계하중을 얻을 수 있다.

3.4 설계 밀면 전단력 선택

3.4.1 설계 밀면 전단력 선택

최종 단계에서는 N 개의 목적강도중심에 대한 밀면 전단력 중 설계에 사용할 최종 설계하중을 선택한다. 각 벽체의 변위연성도 및 시스템의 비틀림 회전각을 동시에 고려할 수 있으므로 각각의 비대칭 벽식구조에 가장 적합한 설계하중을 선택할 수 있다. 본 논문은 가장 일반적인 선택기준으로써 최소 밀면전단력 기준을 제안한다. 직접 변위 설계법을 따르면 밀면전단력의 요구량이 가장 작을 때 각 벽체의 변형능력이 최대한 발휘된다.

3.4.2 각 벽체의 설계 밀면 전단력

밀면 전단력을 식 (20)의 강도비에 따라 각 부재에 분배하면 각 부재의 설계하중을 식 (39)와 같이 얻을 수 있다.

$$V_{B,i} = v_i^T V_B \quad (39)$$

4. 비대칭 벽식구조의 설계 예제

4.1 설계 모델

변형에 기초한 비틀림 설계 방법을 비대칭 벽식 구조에 적용하여 성능목표를 만족하는 최적의 설계하중 및 변형 요구량을 구하였다. 예제 구조물로는 그림 6과 같이 한 개의 대칭 벽식 구조(model S)와 세 개의 비대칭 벽식 구조(model A, B, C)를 선택하였다. 네 개의 모델 모두 10m×10m평면과 2.5m의 층고를 갖는 10층 아파트 벽식구조로 가정하며, 각 층은 637kN의 동일한 중량을 갖는다. 질량은 평면의 중앙부에 집중되고 10개 층의 평면은 동일하며 등가의 단층 시스템과 같은 거동을 하는 것으로 가정한다. 각 벽체는 전단과 축력의 영향이 작은 횡보강되지 않은 벽체로 가정하여 FEMA 273

Unit : meter

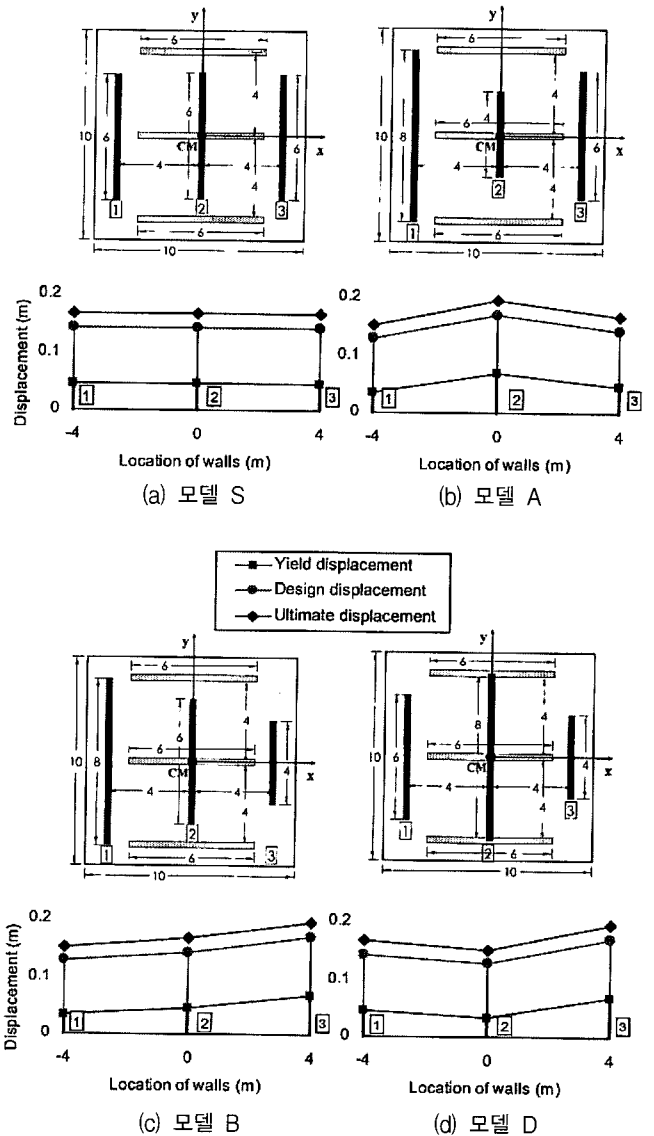


그림 6 설계 모델과 변형 특성

의 소성힌지 회전각 0.008을 적용하여 극한변위를 구했다. 성능목표는 EPA 0.182g에 해당되는 설계지진에 대해 붕괴방지 성능수준을 만족하도록 하였다. 설계 변위스펙트럼은 EPA 0.182g에 대한 가속도 스펙트럼을 변형하여 적용하였다. 각 설계 모델은 지진방향과 직각방향에 각각 세 개의 벽체를 가지며, 각 방향의 벽체 면적의 합은 동일하다. 지진 방향 벽체는 8m, 6m, 4m 길이의 세 가지 벽체를 이용하여 배치를 다르게 하였고 직각 방향 벽체의 길이와 배치는 네 가지 모델에 모두 동일하게 적용하였다. 따라서 비틀림 응답을 고려하지 않는다면 네 개의 설계 모델은 동일한 설계하중에 대해 동일한 응답을 나타내야 하지만 실제로는 각기 서로 다른 비틀림 미커니즘을 발휘하며 각 설계 모델에 요구되는 설계 하중 역시 모델별로 다른 값을 갖는다.

그림 6은 네 개의 설계 모델의 항복, 극한변위와 붕괴방지 성능수준에 대한 설계 변위를 나타낸다. 그림 6(a)의 대칭형 모델은 각 벽체의 변형특성 역시 동일하여 대칭형 분포를 보인다. 그림 6(b)~(d)의 비대칭 모델은 각 벽체의 변형 특성

역시 비대칭 분포를 보인다. 가장 긴 벽체의 항복 변위가 가장 작으며, 가장 짧은 벽체의 항복 변위가 가장 크다. 각 벽체의 설계 변위 역시 동일한 경향을 나타낸다. 또한 각 벽체의 항복 분포가 선형관계를 나타내지 않으므로 모든 벽체가 동시에 항복하지 않으며 일부 부재의 항복 이후 시스템의 강성 특성이 바뀔 것을 예상할 수 있다 비틀림 응답을 고려하지 않고 벽체의 길이에 따라 각 벽체의 강도를 결정했을 때, 비틀림 저항능력이 가장 큰 설계 모델은 모델 A이고, 강도 및 강성 편심이 가장 큰 모델은 모델 B이며 모델 C는 비틀림 저항능력이 가장 작으면서 설계 편심 역시 가장 작은 모델이다.

4.2 각 설계 모델의 비틀림 미케니즘과 설계 하중

3장의 변형에 기초한 비틀림 설계 방법을 4개의 설계 모델에 적용하여 비틀림 미케니즘과 설계 하중을 결정하였다. γ 는 1로 가정하였고, 가장 작은 밀면 전단력과 이때의 질량 중심에서의 변위를 시스템의 목적 설계 변위로 결정하였다. 각 설계 모델에 대한 설계 결과는 표 2와 같이 정리할 수 있다.

그림 7은 4개의 설계 모델의 설계변위와 설계하중 및 비틀림 회전각을 나타낸다. 각 설계 모델이 동일한 중량과 높이 및 벽체면적을 가짐에도 불구하고, 각 시스템의 최대 변형 능력 및 그 때 요구되는 비틀림 회전각 및 설계하중은 비교적 큰 차이를 나타낸다. 대칭형 구조를 갖는 모델 S는 가장 작은 설계하중을 요구하며, 모델 B가 세 개의 비대칭 구조 중 가장 작은 설계하중을 요구한다. 모델 S와 모델 B는 설계하중과 설계 변위는 거의 비슷하지만 비틀림 회전각의 요구량은 큰 차이를 나타낸다. 이는 비대칭 구조물의 경우라도 가장 효과적으로 변형능력을 발휘할 수 있는 허용 가능한 비틀림 미케니즘에 대해 각 부재의 강도를 결정할 경우 요구하중을 대칭형 구조물 수준으로 줄일 수 있음을 보여준다. 반면 모델 C의 경우는 설계하중이 모델 A보다 13.5% 크며, 목적 설계 변위는 가장 작다. 밀면 전단력은 목적설계변위에 직접적인 영향을 받으며 목적설계변위가 클수록 밀면 전단력의 요구량은 작아지는 것을 알 수 있다.

반면 시스템의 변위연성비는 밀면 전단력과 직접적인 연관성을 찾을 수 없다. 기존의 내진설계법을 따를 경우 네 개의 설계 모델은 동일한 높이와 벽량을 가지므로 탄성응답에 대해서는 동일한 탄성설계하중을 가지며 비탄성 응답을 고

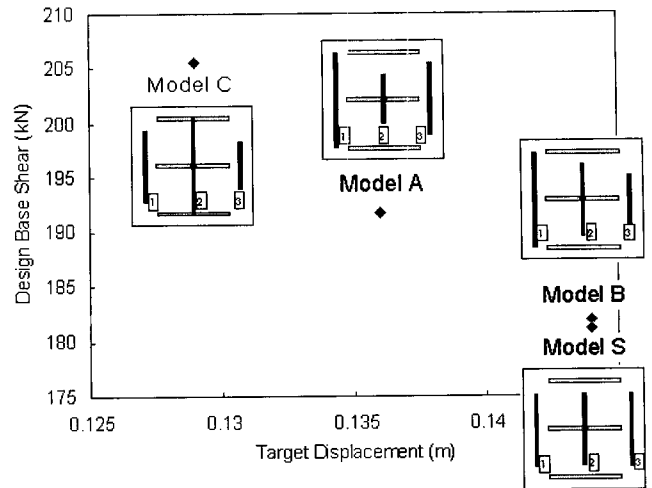


그림 7 각 설계 모델의 설계 하중과 목적 설계 변위

려하기 위해 반응수정계수로 탄성 설계하중을 나누면 변위연성비가 클수록 설계하중은 작아야 한다. 그러나 표 2의 결과는 이러한 상관관계를 보이지 않는다. 이는 네 개의 시스템의 항복 변위가 각기 다른 것으로 설명할 수 있다. 즉, 네 개의 시스템이 동일한 항복변위를 갖는다면 변위연성비가 클수록 설계하중은 작아지지만 실제로 벽체의 배치에 따라 각 시스템의 항복변위는 달라진다. 모델 C의 예를 들면, 목적설계 변위가 2번 벽체에 의해 결정되어 네 개의 모델중 가장 작지만 항복 변위 역시 2번 벽체에 의해 결정되며 4개의 설계모델 중 가장 작은 값을 나타낸다. 따라서 결과적으로 변위연성비가 더 작은 모델 B가 모델 C보다 밀면전단력은 오히려 작아진다.

그림 8~10은 목적 강도 편심비의 변화에 따른 세 개의 비대칭 모델의 밀면 전단력과 목적설계 변위의 변화 특성을 나타낸다. e_1 은 밀면 전단력이 가장 작은 강도편심비를 나타내고 e_2 는 강도편심비 0을 나타낸다. 모든 비대칭 모델이 세 개의 벽체가 최대한 변형능력을 발휘할 때 최소의 밀면 전단력을 요구하는 것을 볼 수 있다. 특히 세 개의 벽체의 설계 변위가 선형 분포에 가까운 모델 B의 경우는 e_1 에서 모든 벽체가 최대한의 변형능력을 발휘하며 따라서 최소 설계 하중 역시 세 개의 비대칭 모델 중 가장 작은 값을 나타낸다. 목적 강도 편심비가 0일때에는 최종 비틀림 회전각이 0에 가깝다. 또한 모델 C와 같은 경우는 강도편심비가 0일때의 설계 하중이 최소 설계하중과 거의 동일하며 모델 B와 모델

표 2 각 설계 모델의 비틀림 설계 결과

설계 모델	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)
	Δ_{CM}^T	V_B	θ^T	μ_{sys}	ξ_{sys}	Δ_{yield}^T	T_{eff}	e_V^T	e_S^T	ρ_v^T	ρ_k^T
S	0.144	181.01	0.0000	3.10	0.169	3.78	0.047	0.000	0.000	0.462	0.462
A	0.136	191.68	0.0016	3.15	0.169	3.57	0.043	-0.035	-0.088	0.493	0.484
B	0.144	181.98	0.0048	2.82	0.168	3.76	0.051	-0.120	-0.190	0.446	0.415
C	0.129	205.51	0.0019	3.06	0.166	3.36	0.042	-0.050	-0.063	0.418	0.380

(a) 목적 설계 변위(m) (b) 밀면 전단력(kN) (c) 비틀림 회전각(rad) (j) 정규강도회전반경 (d) 변위 연성비 (e) 유효 감쇠비(%)
 (f) 항복 변위(m) (k) 정규강성회전반경 (g) 유효 주기(sec) (h) 강도 편심 (i) 강성 편심

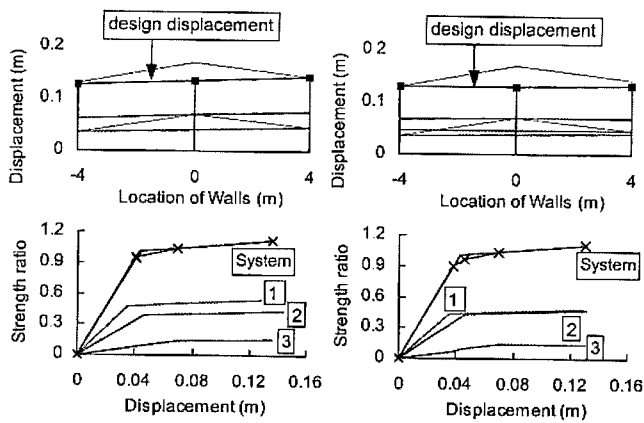


그림 8 모델 A의 강도편심비에 따른 변위-강도비 관계

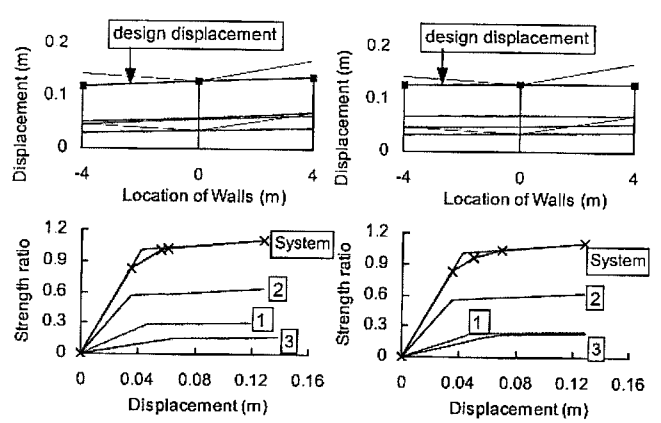


그림 10 모델 C의 강도편심비에 따른 변위-강도비 관계

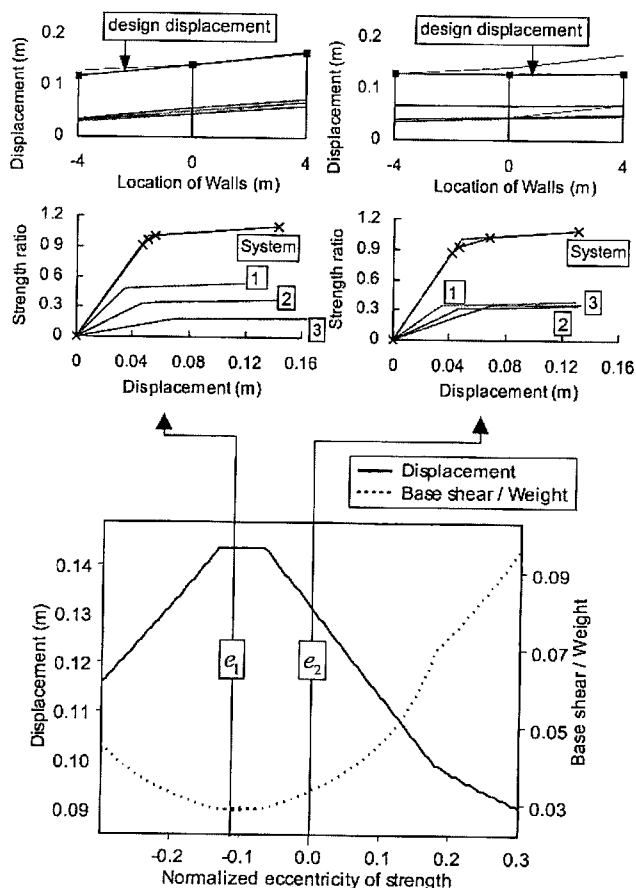


그림 9 모델 B의 강도편심비에 따른 변위-강도비 관계

A의 경우도 밀면 전단력 요구량이 크게 증가하지는 않는다. 따라서 설계자의 의도가 설계하중을 최대한 줄이느냐 아니면 비틀림 회전각을 최대한 줄이느냐에 따라 설계 강도 편심비를 그림 8~10의 e_1 과 e_2 사이에서 결정할 수 있다.

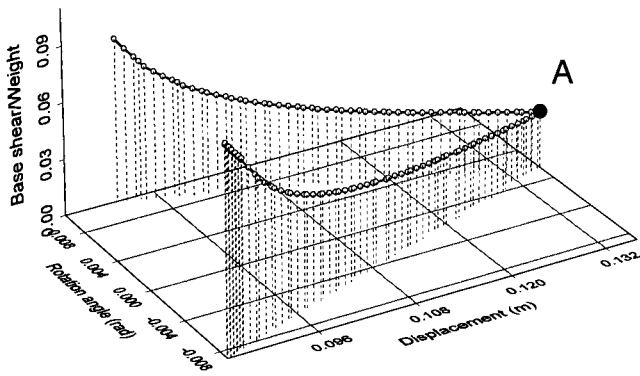
비대칭 구조의 변위와 비틀림 회전각 및 밀면전단력을 3차원 좌표로 나타내면 보다 효과적으로 변형에 기초한 비틀림 설계법을 적용할 수 있다. 그림 11은 변위와 비틀림 회전각에 대한 밀면전단력 계수의 요구량을 나타낸다. 허용 가능한 변위와 비틀림 회전각의 범위 내에서 가장 작은 밀면 전단력을 요구하는 점을 찾으면 대상 비대칭 구조물에 대한 변형에 기초한 비틀림 설계가 가능하다. 그림 11에서 A로 표시한 점은 밀면 전단력을 최소로 요구하는 변위와 비틀림 회전각의 조합을 나타낸다.

4.3 비틀림 회전각에 대한 γ 의 영향

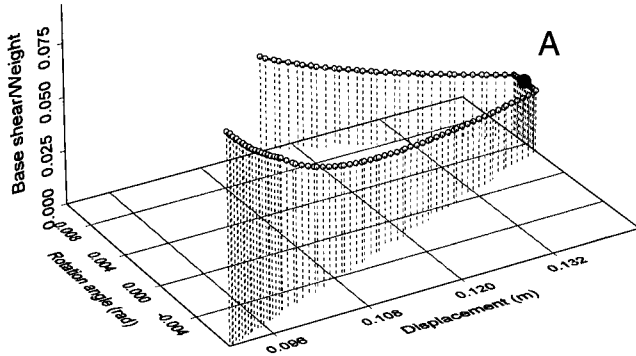
Paulay^{(10),(11)}는 비틀림에 구속된 시스템의 경우, 지진방향 부재들이 모두 항복했을 때, 직각방향 부재들만이 비틀림에 저항한다고 보고 식 (40)~(41)과 같이 강도 편심으로부터 극한 상태에서의 비틀림 회전각을 예측하였다.

$$\theta_{paulay} = \frac{e_v \sum V_{y,j}}{K_T^{tr}} \quad (40)$$

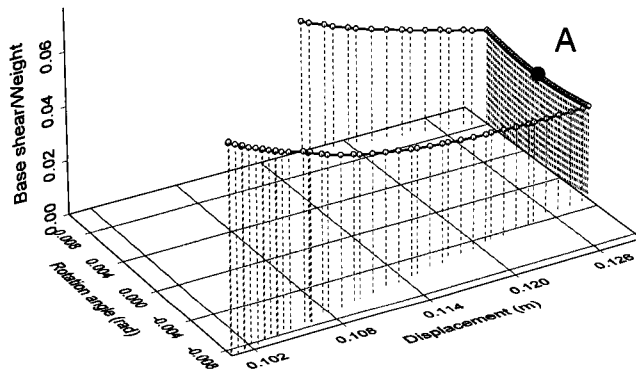
$$K_T^{tr} = \sum K_{x,i} (y_j - y_s)^2 \quad (41)$$



(a) 모델 A



(a) 모델 B



(c) 모델 C

그림 11 비대칭 설계 모델의 하중-변위-비틀림 회전각 관계

여기서, K_x 는 직각방향 부재들에 의한 비틀림 강성을 나타낸다.

그림 12는 $\gamma=1.5, 1.25, 1.0, 0.75$ 에 대해 범위 내의 목적 강도 편심비 변화에 따른 비틀림 회전각을 나타낸다. θ^T 는 모든 벽체의 강성을 고려한 값으로 식 (29)에 의한 비틀림

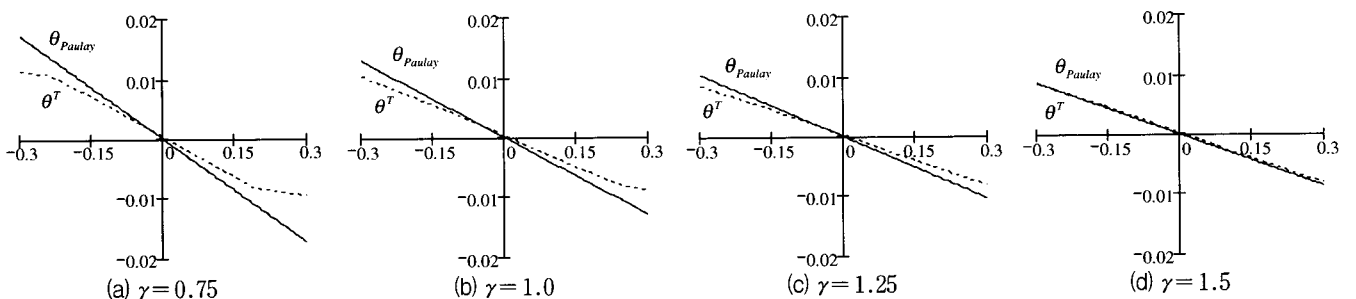


그림 12 모델 A의 비틀림 회전각에 대한 의 영향

회전각을 나타낸다. 그림 12(d)의 $\gamma=1.5$ 인 경우는 두 개의 비틀림 회전각이 거의 유사함을 볼 수 있다. 이는 실제로 대부분의 비틀림 강성을 직각방향 부재가 부담하는 것으로 설명할 수 있다. 반면 γ 가 1.25인 경우는 지진방향 벽체의 비틀림 저항 능력을 무시한 Paulay에 의한 식이 비틀림 회전각을 과대 평가하며 γ 값이 작을수록 두 개의 회전각의 차이가 커진다. 따라서 γ 값이 크고 여상되는 최종 비틀림 회전각이 작은 경우는 다중의 목적강도중심을 설정하지 않고, 벽체의 변위분포로부터 단일의 목적 비틀림 회전각을 직접 결정하고, 식 (40)에 의해 직접 목적 강도 편심을 구한 후, 강도를 분배하는 단순 설계법을 사용할 수 있다.⁽¹⁶⁾

5. 결론

구조 벽체의 실제 변형 특성에 근거하여 변형에 기초한 비틀림 설계법을 비대칭 벽식 구조에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벽체의 강성과 강도가 상호 연관성을 갖는다는 기본 가정에 근거하여 변형(변위와 회전각)을 설계 변수로 사용하는 비틀림 설계법을 제안하였다. 제안된 설계 방법은 비대칭 시스템의 목적 강도중심을 설정하고, 이를 만족하도록 부재의 강도비를 결정한 후 이 때의 목적설계변위와 비틀림 회전각에 대하여 설계하중을 구하는 방법으로, 비대칭 벽식구조의 성능에 기초한 내진설계에 효과적으로 사용될 수 있다.
- 2) 변형에 기초한 비틀림 설계법을 이용하면 다중의 강도 편심비에 대한 다중의 밀면 전단력을 결정할 수 있으며 이중 최소의 밀면전단력을 요구할 때 비대칭 시스템은 변형 능력을 최대한 발휘한다. 설계 하중과 함께 각 벽체의 변위 요구량 및 비틀림 회전각을 동시에 고려할 수 있으므로 의도하는 성능목표를 효과적으로 만족시킬 수 있다.
- 3) 동일한 벽량을 가지면서 벽체의 배치만 다르게 한 네 개의 설계 모델에 대하여 변형에 기초한 비틀림 설계법을 적용한 결과 각각의 벽식 구조의 변형 특성을 고려한 목적설계변위와 밀면 전단력을 얻었다. 가장 큰 목적설계변위를 발휘하는 비대칭 모델 B와 대칭 모델 S가 가장 작은 밀면 전단력을 요구한다. 모델 S와 모델 B는 목적설계 변위와 밀면 전단력은 거의 같지만 비틀림 회전각 및 강도

- 편심은 모델 B가 훨씬 크다. 이는 변형에 기초한 비틀림 설계법의 특징을 가장 잘 나타내는 결과로, 비대칭 시스템인 모델 B의 비틀림 미케니즘을 허용하고 그 미케니즘을 만족하도록 각 벽체의 강도비를 결정할 경우 설계하중을 대칭 구조물 수준으로 줄일 수 있다는 것을 의미한다.
- 4) 직각 방향과 지진 방향의 밀면전단력의 비 γ 가 1.25 이상인 경우 직각방향 부재가 비틀림에 충분히 저항하는 시스템으로 판단할 수 있으며 Paulay가 제안한 비틀림에 구속된 시스템으로 가정하여 비틀림 회전각으로부터 강도 편심비를 직접 계산할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국 과학재단의 특정목적기초연구(1999-1-310-002-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Uniform Building Code, *International Conference of Building Officials*, Whittier, California, 1997.
2. CEN Techn. Comm. 250/SC8, *Eurocode 8: Earthquake-Resistant Design of Structures*, CEN, Berlin, 1995.
3. SANZ(Standards Association of New Zealand), *NZS 4203 : General Structural Design and Design Loadings for Buildings*, Wellington, 1992.
4. Chandler, A. M. and Duan, X. N., "Performance of asymmetric code-designed buildings for serviceability and ultimate limit states," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 26, 1997, pp. 717-735.
5. Tso, W. K. and Smith, R. S. H., "Re-evaluation of seismic torsional provisions," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 28, 1999, pp. 899-917.
6. Humar, J. L. and Kumar, P., "Effect of orthogonal inplane structural elements on inelastic torsional response," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 28, 1999, pp. 1071-1097.
7. Priestley, M. J. N. and Paulay, T., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry*.
8. Priestley, M. J. N. and Kowalsky, M. J., "Direct displacement-based seismic design of concrete buildings," *Bulletin*, New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 33, 2000, pp. 421-444.
9. Priestley, M. J. N. and Kowalsky, M. J., "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.
10. Paulay, T., "Torsional mechanisms in ductile building systems," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 27, 1998, pp. 1101-1121.
11. Paulay, T., "A simple displacement compatibility-based seismic design strategy for reinforced concrete buildings," *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper 0062, 2000.
12. Bluebook SEAOC, "Guidelines for performance-based seismic engineering," SEAOC Blue Book-draft of Appendix I, 1999.
13. Panagiotakos, T. B. and Fardis, M. N., "Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 2, 2001, pp. 135-148.
14. Wallace, J. W. and Thomsen IV, J. H., "Seismic design of RC structural walls; Part I: New code format, Part II: Application," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 3, 1995.
15. ATC, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *FEMA Report 273*, Applied Technology Council for the Building Seismic Safety Council, Washington, D.C, 1997.
16. Cho, B. H. and Hong, S. G., "Displacement based seismic design of asymmetric-plan buildings," *KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001, pp. 361-370.