

RC 전단벽의 재료 물성과 부재 그룹핑을 고려한 고층건물 변위조절설계법 개발

Development of Drift Design Method of High-rise buildings considering Material Properties of Shear Walls and Design Variable Linking Strategy

서지현* 박효선**
Seo, Ji Hyun Park, Hyo Seon

Abstract

Resizing techniques have been recognized as practical methods for drift design of high-rise building since sensitivity analysis and iterative structural analysis are not required in implementation. In the techniques, the amount of material of a member in a building for resizing is determined in terms of cross-sectional areas and sectional inertia moments as design variables. In this study, five drift design methods are developed by considering design variable linking strategy and formulating resizing algorithm in terms of material properties of shear walls as a design variable. The developed methods are applied to the drift design of 20-story frame-RC shear wall structure, and then evaluated in the view points of practicality and efficiency.

1. 서론

최상층 변위 제어나 진동제어와 같은 고층 건물의 사용성 문제는 고층 건물의 구조설계를 결정짓는 중요한 요소이며, 이에 따라 고층 건물 설계의 효율성과 경제성이 결정된다. 고층 건물 변위 제어 설계는 기존의 설계자의 경험과 직관의 의한 설계를 탈피하여, 최적화 기법을 이용하여 변위를 제어하고자 하는 연구가 진행 중이다. 하지만 민감도 해석이나, 반복적인 구조해석에 의존한 최적화 기법은 고층 건물의 부재수를 고려하면 과도한 계산량의 요구로 인해 실무 적용에는 많은 한계가 있다.^{1),2)} 1990년 이후 에너지법을 이용한 변위 설계법이 소개되었으며, 그 후 에너지법을 발전시킨 재분배 기법(Resizing Techniques)이 고층건물 변위제어에 실용적으로 적용될 수 있음이 증명되었다.³⁾ 재분배 기법은 에너지법에 근거하여 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 변위기여도(Displacement Participation Factors)를 구하고 이를 구조 정식화를 통하여 간단한 계산만으로 물량을 분배함으로써 변위를 제어하는 실용적인 변위제어 방법이다. 재분배 기법을 이용한 변위 조절설계법은 강구조물을 대상으로 개발되었으며⁴⁾, 그 후 강접 골조-전단벽 구조물에도 적용 가능한 방법이 개발되었다.⁵⁾⁶⁾ 또한, 재분배 기법의 실용성과 적용성을 높이기 위한 방법들이 발표되었거나 연구 개발 중이다. 대부분의 재분배 기법을 이용한 변위조절설계법은 단면적이나 단면 2차모멘트를 설계변수로 사용하였으며, 구조물 내에 전단벽이 있는 경우 전단벽은 두께를 조절하여 물량을 재분배하였다. 하지만 실제 시공되어 지는 대부분의 주거 및 업무용 고층 건물에서 전단벽의 두께는 전 층에서 동일하게 하고, 전단벽 콘크리트의 강도를 조절하여 강성 및 강도 조건을 만족시키고 있다. 그러므로 일반 골조는 단면적을 설계변수로 사용하

* 연세대학교, 건축도시공학부 박사과정

** 정회원, 연세대학교, 건축도시공학부 부교수

고, RC 전단벽은 재료물성(콘크리트의 탄성계수)을 설계변수로 한 변위조절설계법을 고층건물 변위조절 설계법이 제안되었다. 하지만 선행 연구⁷⁾에서 RC 전단벽의 재료물성(탄성계수)을 설계변수로 사용했을 경우, 콘크리트의 탄성 계수 변화보다는 콘크리트 강도의 변화가 크므로, 최종 콘크리트 강도가 지나치게 높거나 낮은 문제가 발생하였다. 이를 보완하기 위해 전단벽의 두께와 콘크리트 강도를 함께 설계변수로 사용하여 콘크리트 강도의 변화를 조금은 완화시킬 수는 있었으나, 효과적이지는 못 했다. 그러므로 본 연구에서는 선행 연구 내용을 발전시켜, RC 전단벽의 물성이나 RC 전단벽의 두께를 설계 변수로 사용하면서 RC 전단벽의 재료 물성이나 두께에 제약 조건을 적용하여 RC 전단벽의 두께와 물성을 제한하였으며, 또한 실용성을 높이기 위해 부재 그룹핑(Design Variable Linking Strategy)을 고려한 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 RC 전단벽의 재료 물성과 두께, 제약 조건 및 부재 그룹핑 여부에 따라 5가지의 변위조절설계기법을 20층 강접 골조-전단벽 구조물에 적용하여 성능 및 효율성을 비교 평가하였다.

2. 변위기여도 및 구조 정식화

변위기여도는 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재들의 기여도를 나타내는 것으로서 구조해석 결과인 부재력을 이용하여 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\delta_i = \sum_{i=1}^m \delta_i = \sum_{i=1}^m \left\{ \int_0^l \frac{N_i^L N_i^U}{EA_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^L M_i^U}{EI_i} dx + \alpha \int_0^l \frac{V_i^L V_i^U}{GA_i} dx \right\} \quad (1)$$

여기서 δ_i , δ_i 는 각각 제어하고자 하는 구조물 최상층의 변위와 i 번째 부재의 변위기여도를 나타내며, N , M , V 는 각각 축력, 모멘트, 전단력을 나타내며, 상첨자 L 과 U 는 각각 실재하중과 단위하중을 나타낸다. 이와 같이 i 번째 부재의 부재 변위기여도는 축력, 전단력, 모멘트에 의한 변위기여도의 합으로 구해지며, 제어하고자 하는 구조물 최상층의 변위는 각 부재의 변위기여도의 합으로 구해진다. 식 (1)에서 구해진 변위기여도는 식 (2), (3)과 같이 정식화될 수 있다. 본 연구에서 목적함수는 제어하고자하는 건물 최상층의 변위(δ_i)를 최소화하는 것으로 하였으며, 제약함수는 물량 분배 전후의 물량 변화가 없는 것으로 가정하였다. K-T 조건을 이용하면 강재와 RC 전단벽의 수정계수 β_i , β_j 는 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{mimize } \delta_i = \sum_{i=1}^{ms} \frac{\delta_i}{\beta_i} + \sum_{j=1}^{mc} \frac{\delta_j}{\beta_j} \quad (2)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^{ms} \beta_i W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \beta_j W_j = \sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j \quad (3)$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i}{W_i} \frac{\sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j}{\sum_{i=1}^{ms} \sqrt{\delta_i W_i} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \sqrt{n \delta_j W_j}}} \quad i = 1, \dots, ms \quad (4)$$

$$\beta_j = \sqrt{\frac{n \delta_j}{W_j} \frac{\sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j}{\sum_{i=1}^{ms} \sqrt{\delta_i W_i} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \sqrt{n \delta_j W_j}}} \quad j = 1, \dots, mc \quad (5)$$

여기서, δ , β , W 는 각각 변위기여도, 물량 수정계수, 물량을 나타내며, 하첨자 i, j 는 각각 철골 부재, RC 부재를 나타내고, ms, mc 는 각각 철골 부재 수와 RC 부재수를 나타낸다. n 은 RC 물량을 철골 물량으로 치환하기 위한 철골과 RC의 탄성계수 비를 나타낸다.

3. 5 가지의 변위조절 설계법

본 연구에서는 RC 전단벽의 설계변수와 제약조건 및 부재 그룹핑에 따라 표 1과 같이 5가지의 변위조절 설계법을 제안하였으며, 모든 방법에서 강재의 설계변수는 단면적이 사용되었다. 제약조건에서 괄호 안의 숫자는 초기 설계변수 값에 대한 변위조절설계 후 설계변수의 변화 한계를 나타낸다. 변위조절설계법은 강도설계 모듈과 결합하여 그림 1과 같은 고층건물 변위설계 모델로 구성된다.

표 1. 5가지의 변위조절설계법

구 분	RC 전단벽 설계변수	제약조건	부재 그룹핑
ALT I	탄성계수	없음.	NO
ALT II	탄성계수	탄성계수(50%)	NO
ALT III	탄성계수, 두께	탄성계수(30%), 두께(30%)	NO
ALT IV	탄성계수	탄성계수(10%)	YES
ALT V	탄성계수, 두께	탄성계수(30%), 두께(30%)	YES

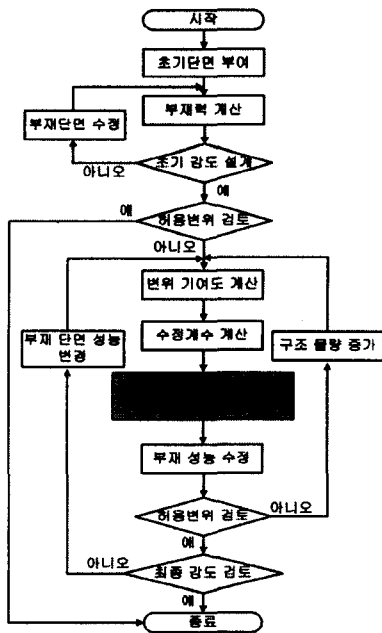


그림 1. 고층건물 변위설계 모델

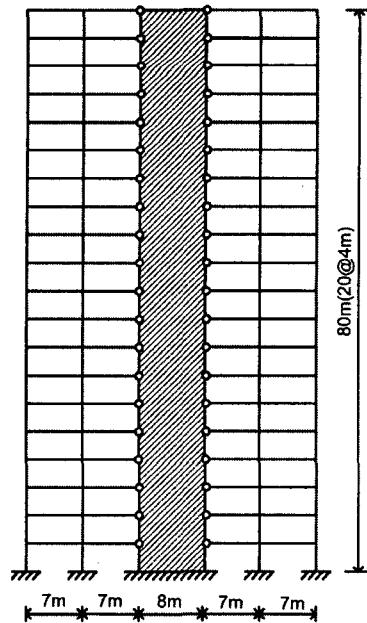


그림 2. 예제 구조물

4. 적용

예제로 사용된 20층 강접-골조 전단벽 구조물은 높이 80M, 밀면길이 36M이며, 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 전단벽으로 구성되어 있다. 초기 설계된 철골 부재는 AIK-ASD 83의 하중 조합을 만족하도

록 결정하였다. 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 2400kgf/cm^2 , $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 철근의 항복강도는 4000kgf/cm^2 이다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 분담면적을 12m로 가정하여 산정하였다. 사하중과 활하중은 각각 4000kgf/m , 1600kgf/m 의 등분포 하중을 보에 작용시켰다. 제어하고자하는 건물 최상층변위는 건물 높이의 1/500(16cm)로 가정하였다. 그림 2는 20층 예제 구조물의 단면도를 나타낸다.

4. 1. ALT I

초기 설계된 모델에 대해서 제안된 변위설계 모델로 구조물 최상층 변위를 예측하면, 최상층 변위는 17.88cm로서 상용 구조해석 소프트웨어에 의한 최상층 변위 17.66cm와 거의 일치한다. Alt I에서 RC 전단벽의 재료물성(탄성계수)이 설계변수로 사용되었으므로, 제약 조건과는 달리 전체 재분배 후 전체 물량의 변화가 발생한다. 재분배후 변위는 12.31cm로서 초기 변위의 69%로 감소한다. 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가적인 물량의 증가는 없으며, 강도설계 과정에서 기둥과 보의 물량은 증가하게 되어 변위는 12.06cm로 예측된다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하면, 최상층 변위는 10.32cm로서 예측 변위 12.06cm와는 17%의 오차를 보인다. 이러한 오차는 부정정 구조물에서 재분배에 따라 강성 재분배 및 응력 재분배가 일어났기 때문이다. 상용 구조해석 소프트웨어의 재해석에서 얻어진 부재력과 최종 부재 성능을 이용하여 변위설계 모델로 예측된 최상층 변위는 10.52cm로서 상용 구조해석 소프트웨어에서 얻어진 10.32cm와 근사하다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 1.148cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후에는 0.801cm로 감소하며 16층에서 발생한다. 표 2는 Alt I의 변위조절설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. 그림 3, 그림4는 RC 전단벽의 두께와 탄성계수의 변화를 잘 나타내고 있다. Alt I에서는 RC 전단벽의 두께는 변화가 없으나, RC 전단벽의 물성이 수정되며, RC 전단벽 재료물성에 제약이 없으므로 변위설계 후 상하층의 재료물성 값은 큰 편차를 보인다. 변위조절 설계 후 1층 RC 전단벽 콘크리트 강도는 1253kgf/cm^2 로 나타난다.

표 2. 물량과 변위기여도의 변화 (ALT I)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크 후	재해석
	기둥	82.78	68.013	76.13	76.13
보	71.87	89.62	91.49	91.49	
전단벽	219.80	219.43	219.80	219.8	
전체	374.45	377.07	387.42	387.42	
변위기여도 (단위: cm)	기둥	2.61	2.52	2.34	2.72
	보	4.69	2.02	1.95	2.78
	전단벽	10.58	7.77	7.77	5.02
	전체	17.88	12.31	12.06	10.52
최상층 변위 (단위: cm)	상용 소프트웨어	17.66	-	-	10.32

4. 2. ALT II

Alt II에서는 RC 전단벽의 탄성계수의 변화율을 초기 값의 50%로 제한하였다. 초기 해석 결과는 Alt I과 동일하다. 재분배후 변위는 14.02cm로서 초기 변위의 78%로 감소한다. 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가적인 물량의 증가는 없으며, 강도설계 과정에서 기둥과 보의 물량은 증가하게 되어 변위는 13.77cm로 예측된다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하면 최상층 변위는 11.19cm로 감소한다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 1.148cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후에는 0.77cm로 감소하며 13층에서 발생한다. 표 3은 Alt II의 변위조절설

계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. Alt II에서 RC 전단벽의 두께는 변화가 없으나, 재료 물성은 초기 재료 물성의 50% 범위로 제한되었으며, 이에 따른 1층 RC 전단벽 콘크리트 강도는 686kgf/cm²로 나타난다.

표 3. 물량과 변위기여도의 변화 (ALT II)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크 후	재해석
	기둥	82.78	68.01	76.13	76.13
보	71.87	89.62	91.49	91.49	
전단벽	219.80	219.80	219.80	219.80	
전체	374.45	377.43	387.42	387.42	
변위기여도 (단위: cm)	기둥	2.61	2.52	2.34	3.08
	보	4.69	2.02	1.95	3.20
	전단벽	10.58	9.48	9.48	5.09
	전체	17.88	14.02	13.77	11.37
최상층 변위 (단위: cm)	상용 소프트웨어	17.66	-	-	11.19

4. 3. ALT III

Alt III에서는 RC 전단벽의 탄성계수와 두께를 설계변수로 사용하였으며, RC 전단벽의 초기 탄성계수와 두께를 초기값의 30% 범위를 벗어나지 않도록 제한하였다. 초기 해석 결과는 Alt I과 동일하다. 재분배후 변위는 14.52cm로서 초기 변위의 81%로 감소한다. 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가적인 물량의 증가는 없으며, 강도설계 과정에서 기둥과 보의 물량은 증가하게 되어 변위는 14.28cm로 예측된다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하면 최상층 변위는 11.59cm로 감소한다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 1.148cm로 16층에서 발생하였으나, 변위 설계 후에는 0.8cm로 감소하며 12층에서 발생한다. 표 4는 Alt III의 변위조절설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. Alt III에서 변위설계 후 RC 전단벽의 두께 및 재료 물성은 초기 두께 및 재료물성의 30% 범위로 제한되었으며, 이에 따른 1층, 20층의 RC 전단벽 콘크리트 강도는 각각 476kgf/cm², 115kgf/cm²로 나타난다.

표 4. 물량과 변위기여도의 변화 (ALT III)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크 후	재해석
	기둥	82.78	68.01	76.13	76.13
보	71.87	89.62	91.49	91.49	
전단벽	219.80	221.62	221.62	221.62	
전체	374.45	379.25	389.24	389.24	
변위기여도 (단위: cm)	기둥	2.61	2.518	2.34	3.31
	보	4.69	2.02	1.95	3.43
	전단벽	10.58	9.98	9.98	5.06
	전체	17.88	14.52	14.28	11.79
최상층 변위 (단위: cm)	상용 소프트웨어	17.66	-	-	11.59

4. 4. ALT IV

Alt IV에서는 RC 전단벽의 탄성계수를 설계변수로 사용하였으며, 재분배 후의 RC 전단벽의 탄성계수가 초기 탄성계수의 10% 범위를 벗어나지 않도록 제한하였다. 또한, 부재 그룹핑(Design Variable Linking Strategy)을 사용하여 그룹 내의 부재는 같은 단면성능과 물성을 가지도록 하였다. 초기 해석 결과는 Alt I과 동일하다. 재분배후 변위는 15.04cm로서 초기 변위의 84%로 감소한다. 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만

족하므로 변위제어를 위한 추가적인 물량의 증가는 없으며, 강도설계 과정에서 기둥과 보의 물량은 증가하게 되어 변위는 14.67cm로 예측된다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하면 최상층 변위는 13.68cm로 감소한다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 1.148cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후에는 0.888cm로 감소하며 13층에서 발생한다. 표 5는 Alt IV의 변위조절설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. Alt IV에서 변위설계 후 RC 전단벽의 재료 물성은 초기 재료 물성의 10% 범위로 제한되었으며, 이에 따른 1층, 20층의 RC 전단벽 콘크리트 강도는 각각 304kgf/cm², 190kgf/cm²로 나타난다.

표 5. 물량과 변위기여도의 변화 (ALT IV)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크 후	재해석
	기둥		82.78	68.00	81.03
보		71.87	91.58	91.58	91.58
전단벽		219.80	219.80	219.80	219.80
전체		374.45	379.39	392.42	392.42
변위기여도 (단위: cm)	기둥	2.61	2.49	2.12	3.28
	보	4.69	2.13	2.13	3.95
	전단벽	10.58	10.41	10.41	6.63
전체		17.88	15.04	14.67	13.86
최상층 변위 (단위: cm)	상용				
	소프트웨어	17.66	-	-	13.68

4. 5. ALT V

Alt V에서는 RC 전단벽의 탄성계수와 두께를 설계변수로 사용하였으며, 재분배 후의 RC 전단벽의 탄성계수와 두께가 초기 탄성계수와 두께의 30% 범위를 벗어나지 않도록 제한하였다. 또한, 부재 그룹핑(Design Variable Linking Strategy)을 사용하여 그룹 내의 부재는 같은 단면성능과 물성을 가지도록 하였다. 초기 해석 결과는 Alt I과 동일하다. 재분배후 변위는 14.76cm로서 초기 변위의 83%로 감소한다. 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가적인 물량의 증가는 없으며, 강도설계 과정에서 기둥과 보의 물량은 증가하게 되어 변위는 14.39cm로 예측된다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하면 최상층 변위는 13.17cm로 감소한다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 1.148cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후에는 0.914cm로 감소하며 13층에서 발생한다. 표 6은 Alt V의 변위조절설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. Alt V에서 변위설계 후 RC 전단벽의 재료 물성 및 두께는 초기 재료물성 및 두께의 30% 범위로 제한되었으며, 이에 따른 1층, 20층의 RC 전단벽 콘크리트 강도는 각각 267kgf/cm², 115kgf/cm²로 나타난다.

표 6. 물량과 변위기여도의 변화 (ALT V)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크 후	재해석
	기둥		82.78	68.00	81.03
보		71.87	91.58	91.58	91.58
전단벽		219.80	221.60	221.60	221.60
전체		374.45	381.19	394.22	394.22
변위기여도 (단위: cm)	기둥	2.61	2.49	2.12	3.34
	보	4.69	2.13	2.13	3.95
	전단벽	10.58	10.14	10.14	6.09
전체		17.88	14.76	14.39	13.37
최상층 변위 (단위: cm)	상용				
	소프트웨어	17.66	-	-	13.17

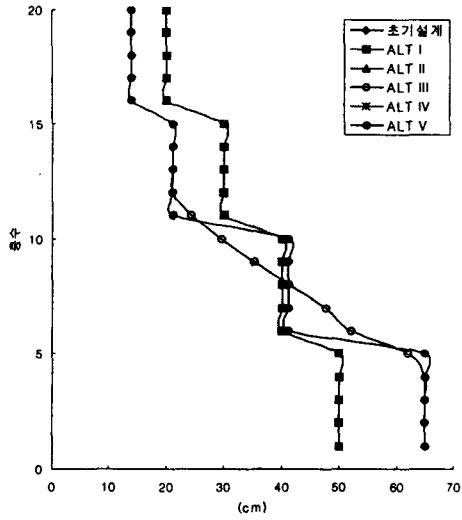


그림 3. RC 전단벽의 두께

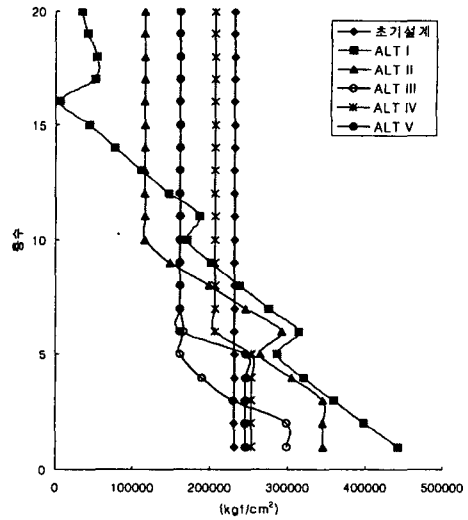


그림 4. RC 전단벽의 탄성계수

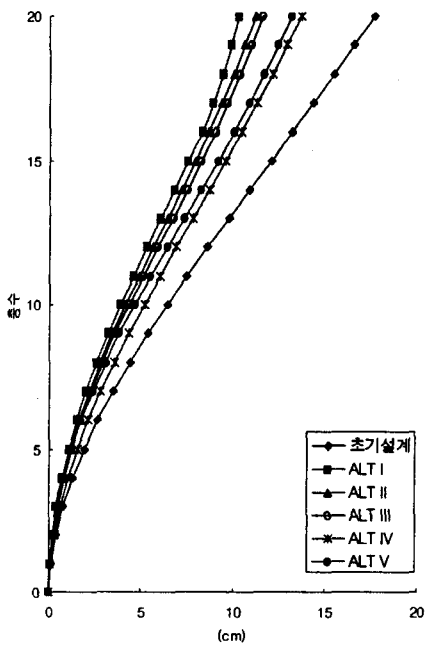


그림 5. 변위

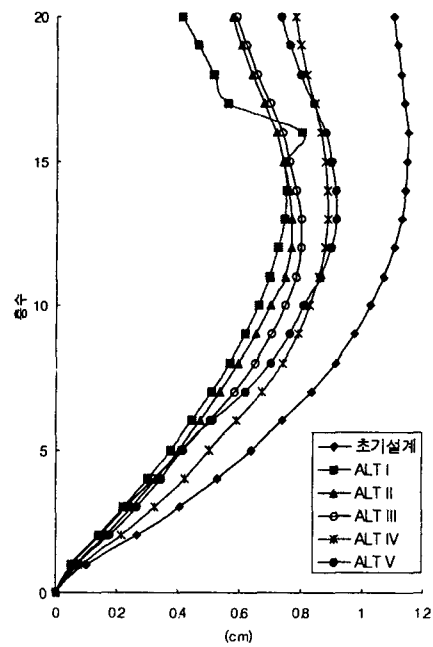


그림 6. 층간 변위

5. 결론

이제까지 대부분의 재분배 기법을 이용한 고층건물 변위조절설계법은 단면적이나 단면 2차모멘트를 설계 변수로 사용하였으나, 실재 주거 및 업무용 고층건물 설계에서는 RC 전단벽의 두께는 고정시키고 RC 전단벽의 재료물성을 조절하여 강성 및 강도 조건을 만족시키고 있다. 본 연구에서는 강재는 단면적을 설계 변수로 고

정한 채, RC 전단벽의 설계 변수와 제약조건 및 부재 그룹핑을 변수로 하여 5가지의 변위조절설계법을 제안하고, 이를 20층 강접 골조-전단벽 구조물의 변위조절 설계에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 5 가지의 변위조절 설계법은 고층건물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있었다.
- 2) Alt I은 변위제어에는 가장 효과적인 방법이나 RC 전단벽의 재료물성의 변화가 너무 커서 최종적으로 비현실적인 콘크리트 강도를 요구하게 된다.
- 3) Alt II는 재분배후 탄성계수의 변화를 제한할 수 있으나 각 층별로 다른 재료 물성을 가지므로 실용적이지 못하다.
- 4) Alt III는 설계변수로 RC 전단벽의 탄성계수와 두께를 함께 사용하며, 최종 RC 전단벽의 물성과 두께를 제한할 수 있는 장점이 있으나, 각 층별로 다른 물성을 가지므로 실용적이지 못하다.
- 5) Alt IV는 RC 전단벽의 탄성계수를 설계 변수로 사용하며 탄성계수의 제약과 부재 그룹핑을 고려하므로, 최종 결정된 부재 성능과 재료 물성은 제약되어 있으며, 그룹핑이 되어 있으므로 실용적으로 사용될 수 있는 방법이다.
- 6) Alt V는 RC 전단벽의 탄성계수와 두께를 함께 설계변수로 사용하며, RC 전단벽의 탄성계수 및 두께의 제약이 가능하고, 부재 그룹핑을 고려하면서 변위조절 설계를 할 수 있으므로 실용적인 방법이 될 수 있다.

이상과 같이 개발된 5가지의 변위조절 설계법은 고층건물의 변위를 효과적으로 제어 할 수 있으나, 실용성을 고려하면 제약조건과 부재 그룹핑이 고려된 Alt IV, Alt V가 실용적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 산·학·연 공동연구개발사업 (과제번호: C102A1000004-03A0200-00410)의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chan, C. M. Optimal lateral stiffness design of tall buildings of mixed steel and concrete construction. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10: 155-177.
2. Panagiotis A. Makris, Christopher G. Probatidis. 2002. Weight minimization of displacement-constrained truss structures using a strain energy criterion, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191: 2159-2177
3. Park, H. S., and Park, C. L., "Drift control of high-rise buildings with unit load method", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 6, No. 1, 1997, pp. 23-35.
4. Park, H. S. and Ahn, S. A. " Resizing Methods for Drift Control of Tall Steel Structures ", *Structural Steel PSSC' 98* Vol 2. pp 1017-1022.
5. 서지현, 박효선 "재분배기법을 이용한 고층 구조물의 수평변위 설계법", 대한 건축학회 논문집, 제17권 제9호, 2001, pp3-80.
6. Park, H. S., Hong, K. P., and Seo, J. H., "Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 11, 2002, pp. 35-49.
7. 서지현, 박효선 "실용적인 철골 프레임-전단벽 시스템의 변위조절법 개발", 한국 강구조학회 학술발표대회 논문집, 2003, pp578-583.