

# 측면하중을 받는 전단벽 구조물의 극한 거동해석

## Ultimate Load Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls

이명규\* 정연석\*\*  
Lee, Myung Kue Chung, Yun Suk

### ABSTRACT

Reinforced concrete shear wall is composed of wall, horizontal and vertical flanges. Due to the abrupt change in its geometry, it is difficult to predict the ultimate behaviour of shear wall in the action of lateral forces. For the better understanding of ultimate state, the propagation of crack and inelastic compressive zone are simulated reasonably. In this study, for the improvement of analysis result for shear wall with flanges, analyses are fulfilled with the application of some modelling methods including various material and geometrical models and numerical methods. The results from various modelling methods are compared and the advisable model is proposed.

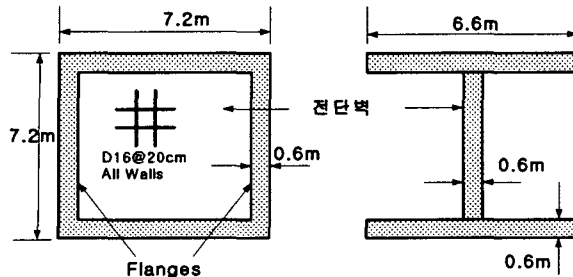
### 1. 서론

전단벽이 측면하중을 받는 경우에 대한 극한 거동을 합리적으로 해석하기 위한 유한요소 모델링방법에 관한 연구내용을 정리하였다. 전단벽 구조물은 일반적으로 플랜지에 연속되는 벽체로 구성되는데 플랜지와 벽체의 접합부의 경우 구조물의 강성이 크게 변하여 극한 상태에서 큰 비선형성을 보이게 된다. 본 연구에서는 구조적 불연속성과 재료적 비선형성이 발생하는 전단벽에 대한 합리적인 수치모델 구성 방법을 제시하기 위하여 해석결과에 영향을 주는 여러 가지 인자 - 콘크리트의 인장 및 압축 거동 모델, 콘크리트 물성과 관련된 상수 값, 철근의 모델링 방법, 하중중분방법 등 -에 대하여 비교 검토를 수행하였다.

### 2. 해석대상 전단벽

#### 2.1 해석대상 전단벽의 상세

해석대상 전단벽의 치수는 다음 그림 1.과 같다. 전단벽은 상부 플랜지와 하부 플랜지에 의해 보강되어 있으며, 벽체의 철근비는 0.003이고 벽체의 두께는 0.6m이다.



$f_{ck} = 27.6 \text{ MPa}$ ,  $f_{ct} = 3.08 \text{ Mpa}$ ,  $f_y = 414 \text{ MPa}$

그림 1. 해석대상 전단벽의 상세

\* 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 정회원, 한국원자력안전기술원

## 2.2 해석대상 전단벽의 극한강도 산정

해석대상 전단벽의 극한 강도를 ACI 318-99에 산정하면 다음과 같다.

$$V_n = 3.3(f'_c)^{1/2}hd + N_u d / 4L_w + A_v f_y d / s_2 = 2155 \text{ kips} = 9.59 \text{ MN}$$

여기서, h = 벽의 두께 = 0.6m/0.0254 = 23.6 in

d = 0.8\*벽의 폭 = 0.8\*6.0m/0.0254 = 189.0 in

$A_v$  = 거리  $s_2$  내의 수평철근 면적 =  $0.0002\text{m}^2 / (0.0254)^2 = 0.31 \text{ in}^2$

$s_2$  = 수평철근의 간격 =  $0.2 / 0.0254 = 7.9 \text{ in}$

$N_u$  = 축방향 하중=(분포하중)\*h\*  $L_w$   
 =  $2.07\text{MPa} * 0.6\text{m} * 6.0\text{m} / 4.45\text{KN/kip} = 1674.6 \text{ kips}$

$L_w$  = 벽체의 폭 =  $6.0\text{m} / 0.0254 = 236.2 \text{ in}$

동일한 전단벽의 강도를 Barda(1977) 등의 실험식을 이용하여 산정하면 다음과 같다.

$$V_c = [8.3(f'_c)^{1/2} - 3.4(f'_c)^{1/2}(H/L_w - 0.5) + N_u / (4hL_w)]hd = 2196 \text{ kips}$$

$$V_s = [a\rho_h + b\rho_v]f_yhd = 892 \text{ kips}$$

$$V_n = V_c + V_s = 3089.8 \text{ kips} = 13.74 \text{ MN}$$

여기서, H = 벽체의 높이 =  $6.0\text{m} / 0.0254 = 236.2 \text{ in}$

a = b - 1

b = 1 ;  $H/L_w < 0.5$

=  $2(1 - h/L_w)$  ;  $0.5 < H/L_w < 1$

= 0 ;  $H/L_w > 1$

계산에 의한 극한 강도는 Barda의 실험식이 ACI식에 비하여 40%이상 큰 것으로 나타나고 있다.

## 3. 수치해석 방법 및 해석 결과

### 3.1 검토를 수행한 모델이나 해석방법에서 공통적으로 적용한 해석기법

해석에서는 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS 6.5를 사용하였다. 비선형 평형방정식을 풀기 위하여 Newton의 방법이용하였으며, 균열발생과 같은 극심한 불연속 거동에 대한 해석의 능률을 증진하기 위해서 수렴성을 검토하기 전에 상대적으로 많은 반복(iteration) 해석을 수행하였다. 해의 수렴성을 높이기 위하여 불평형력이 큰 경우 불평형력벡터(residual vector) 성분을 보정벡터(correction vector)방향으로 최소화하는 line search scale 계수를 찾아 Newton 방법에 의한 불평형력에 대한 보정값을 구하는 Line search 해석기법에 의해 풀었다. 실험식에 의하여 계산된 값과 비교하기 위하여 하중을 증가시켜 극한 상태에 이르도록 하였다.

### 3.2 모델링 기법의 검토 및 평가 방법

검토는 여러 가지 모델링 기법에 대하여 정적하중하의 극한하중을 검토하여 비교하였다. 구조물의 극한 상태를 정의하기 위한 변위비교 기준위치는 그림 2와 같이 벽체의 상단이다. 정적하중을 받는 경우 하중-변위 곡선은 그림 3과 같다. 여기서 항복변위( $\Delta_y$ )는 하중-변위곡선에서 기울기가 크게 변하는 점 A로 이때의 변위는 2.7mm이고 하중은 13.3MN이 된다. 구조물의 극한 상태를 NUREG 6715에서와 같이 항복 변위의 4배( $4\Delta_y$ )되는 점으로 하면 극한 상태는 B로 표시되며 변위는 10.8mm이며 이때의 하중은 15.1MN으로 실험식으로 계산한 값보다 크게 평가되었다.

### 3.3 하중증분방법에 따른 해석 결과

전단벽에 작용하는 극한 하중을 구하기 위하여 하중증분 방법을 정적해석(static analysis)에서 의한 방법과 동적해석(implicit dynamic analysis)에서 의한 방법에 대하여 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 정적해석에서는 하중 증분량을 자동으로 설정하여(automatic time increment) 해석을 수행하였다. 이 설정에서는 초기 증분량에 대한 해석을 수행하고 수렴조건이 만족되는 경우 다음 증분으로

넘어가 일정한 조건이 되면 증분량을 1.25배 증가 시켜 해의 수렴속도를 증가시키고, 수렴에 실패한 경우 증분량을 1/4로 감소시킨 후 정해진 최소 증분량과 비교하여 그 값보다 새로운 증분량이 크면 해석을 계속 수행하고, 작으면 수렴에 실패했다는 결과를 출력하며 해석을 중단하게 된다. 동적해석에 의한 하중증분은 정해진 초기 증분량으로 시작하여 일정한 시간단계 ( $t + \Delta t$ )의 해가 구해지면 ( $t + \Delta t/2$ )에서의 균형불평형력(equilibrium residuals)  $R_{t+\Delta t/2}$ 를 해의 정확성의 판단 기준으로 시간 증분량을 적절하게 조절하여 해석을 진행하는 해석방법이다. 이러한 방법은 Hibbitt과 Karlsson(1979)에 의하여 제안된 개념으로 'half-step residual(반단계 불평형력)'은 반복 수행한 불평형력 벡터의 최대값으로 시간단계해석에서 정확성의 척도가 된다. 수치 실험을 통하여 수렴판단기준으로 이 불평형력 값을 탄성시스템에서 실제 하중의 크기와 비교하여  $R_{t+\Delta t/2} \approx P$ 인 경우 시간증분 해가 보통 정확하다고 알려져 있다. 해석결과 각 해석 방법에 따른 하중-변위 곡선은 그림 4와 같다. 해석결과 항복 하중은 약 13.3MN으로 해석방법에 상관 없이 거의 같은 값을 보였으며 이때 수평변위가 2.7mm로 계산되었다. 극한 하중은 동적해석인 경우 15.1MN으로 정적 해석인 경우 14.2MN보다 약간 큰 값을 보였다.

### 3.4 재료 모델링 방법에 따른 해석결과

콘크리트 재료모델에 따른 해석결과는 그림 5와 같다. 분포균열 모델을 사용하는 경우 항복하중은 손상소성모델보다 더크게 나타났으나 비선형성이 커져서 해가 극한상태에 가지 이르지 못하고 수렴에 실패하였다. 철근 모델의 영향을 검토하기 위하여 탄성-완전소성모델과 탄성-변형 경화모델을 적용한 해석을 수행한 결과는 그림 6과 같다. 해석결과 주어진 전단벽에 대하여는 극한 하중에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그림 7은 동일한 인장강도에 극한 인장 변형을 다르게 가정하여 수행한 해석결과이다. 해석결과 극한 거동에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그림 8은 동일한 극한인장변형에 대하여 인장강도를 20%크고 작게 변화 시킨 경우에 대한 해석결과이다. 이 경우에는 극한 강도의 차가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 주어진 전단벽의 파괴가 플랜지와 벽체의 접합부에 집중되어 발생하는 특성상 인장강도의 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.

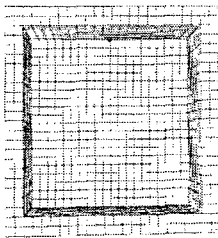


그림 2. 변위 비교 위치

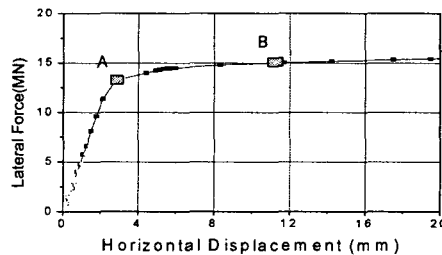


그림 3. 기본구조물의 하중 변위 곡선

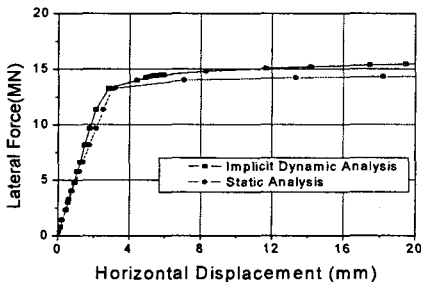


그림 4. 하중증분에 따른 해석결과

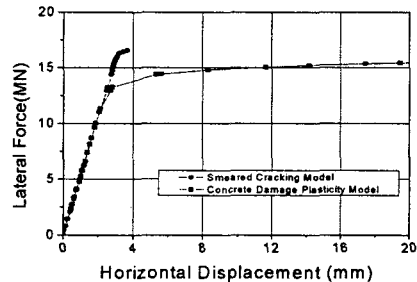


그림 5. 콘크리트 비선형 거동 모델 비교

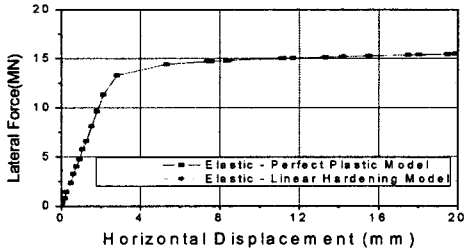


그림 6. 철근의 비선형 거동 모델 비교

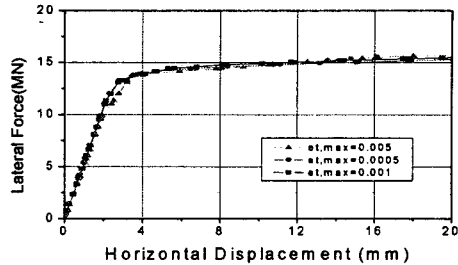


그림 7. 콘크리트 인장증강모델 비교

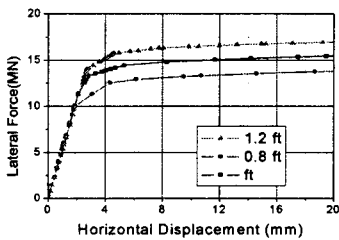


그림 8. 콘크리트 인장 강도 모델 비교

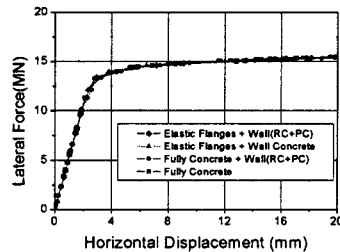


그림 9. 단면 모델 방법에 따른 해석결과

### 3.5 단면의 모델링 방법

전단벽의 단면을 플랜지와 벽체를 모두 비선형 콘크리트로 모델링한 경우, 플랜지의 구속효과를 나타내기 위하여 플랜지 탄성, 전단벽 비선형콘크리트 모델을 적용한 경우, 벽체단면을 철근 주위 단면과 철근과 멀리떨어진 콘크리트를 나타내기 위하여 RC(Reinforced Concrete) zone(콘크리트의 극한 인장변형률 0.002)과 PC(Plain Concrete) zone(극한 인장변형률 0.001)으로 나누어 모델링한 경우(단면을 4등분하여 4개의 층으로 나눈 다음 철근이 존재하는 표면부를 RC zone으로 내부의 두 개 층을 PC zone으로 모델링함)의 3가지 경우에 대한 해석결과는 그림 9와 같다. 해석결과 극한 거동에는 차이가 없으나 균열의 전파, 압축손상영역의 진전을 합리적으로 기술하였다.

### 4. 결론

기하학적 불연속성에 의하여 강성이 크게 변하는 전단벽을 합리적으로 해석하기 위한 모델링 방법을 검토한 결과 하중중분은 implicit dynamic analysis, 콘크리트 재료모델은 Concrete Damage Plasticity Model을 사용하고, 벽체는 비선형 콘크리트로 플랜지는 선형탄성의 재료로 모델링하고, 벽체의 경우 심부 콘크리트와 표면의 철근 주변의 콘크리트로 분할하여 모델링 하는 경우 전단벽의 거동을 극한상태까지 합리적으로 기술할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) NUREG/CR-6715, "Probaility-Based Evaluation of Degraded Reinforced Components in Nuclear Power Plants," by J. I. Braverman, B.R. Ellingwood, D. J. Naus, C.H. Hofmayer, S. Shteyngart, and P. Bezler, Brookhaven National Laboratory, April, 2001.
- 2) ABAQUS User's Manual Ver. 6.5, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc, 2005
- 3) ABAQUS Example Manual Ver. 6.5, Hibbit, Karson & Sorensen, Inc 2005