

프리캐스트 콘크리트 구조벽의 반복횡력에 대한 구조성능

Structural Capacity of Precast Concrete Wall under Horizontal Cyclic Loads

서 수 연*

Seo, Soo-Yeon

Abstract

The purpose of this study is to define the required structural performance of PC structural walls under horizontal load condition. For his, the structural performance of the RC structural wall was reviewed on the base of the existing design guidelines. And the lateral displacement performance of the RC structural wall was evaluated by using the flexural theory. It was checked that the required capacity for PC structural wall to secure the equivalent performance corresponding to the RC structural wall. The progress of the study is based on the analysis of the existing domestic design guidelines. The basic behavior of the wall structure was identified and compared through a simple theoretical approach. As a result, the limiting drift can be obtained from simple flexural theory and it was obtained the result compatible to that of ACI 550.6.

키워드 : 프리캐스트 구조벽, 설계 지침, 휨이론, 반복횡력, 변위

Keywords : PC structural wall, Design guideline, Flexural theory, Cyclic load, Drift

1. 서 론

1.1 연구의 배경

건물에서 구조벽은 지진하중을 견디는 데 매우 효과적인 요소다. 이에 따라, 구조벽의 거동에 영향을 미치는 요소를 파악하고 이를 효과적으로 설계하는 방법에 대한 절차를 검증하기 위해 광범위한 실험 및 분석 연구가 수행되었다. 일부 연구자들은 구조실험을 통하여 구조벽의 구조성능을 정립하였으며 이를 근거로 하여, 현재 구조벽의 성능평가를 위한 자료로 활용되고 있다. 특히, 기존 건물의 구조상태 특히 내진성능을 평가하기 위해서는 일련의 해석적인 과정이 필요하며 이때 기존 구조벽의 구조상태를 적절하게 묘사하는 것은 매우 중요하다.

최근 국내에서는 기존 건물의 내진성능평가 뿐만 아니라 구조물의 성능에 기반한 설계를 도입하여 건물설계를 실시하고 있다. 이때, 무엇보다 중요한 것은 해석단계에서 과연 기존 구조요소들의 구조성능이 제대로 고려되는가에 있다. 이들 개별 구조요소들의 성능에 대해서는 우리나라 및 국외의 지침에서 정하고 있는 해석입력값을 사용하고 있다.

최근 우리나라에서는 인건비의 상승 등에 의하여 프리캐스트콘크리트 (Precast concrete, 이하 PC) 구조에 대한 사용요구가 증가하고 있다. 미국, 유럽과 같은 많은 국가에서 PC구조가 널리 활성화되고 있는데, 그 이유는 현장에서의 작업을 대폭 줄일 수 있으며, PC 개별구조의 크기를 모듈화할 수 있고 조립공정이 비교적 명확하여 모듈화된 제작 및 조립이 가능하기 때문이다. PC구조는 생산회사별로 다양한 형태로 제작되거나 조립되기 때문에, 일체식 철근콘크리트 (Reinforced Concrete, 이하 RC)와 같이 획일화된 상세가 아니라 다양한 상세를 가지게 된다. 이에 따라, 각 상세별로 어느 정도의 구조성능을 보유하고 있는지를 파악하는 것이 매우 중요하다. 특히, 전술한 바와 같이, 이들 PC 구조에 대한 내진성능평가를 실시하거나 성능설계를 위해서는 각 상세별로 다양하게 나타나는 성능특성을 제대로 이해하고 이를 반영하는 것이 필요하다. 최근 PC 구조에 대한 설계 개념은 PC구조가 RC구조에 대응되는 성능을 보유하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 다양한 조건하에서 RC구조가 보여주는 성능을 명확하게 파악하는 것이 매우 중요하다.

현재 우리나라에서의 PC 구조는 대부분 골조공사에 국한되는 양상을 보이고 있지만 벽식구조로 널리 활용될 것으로 예상할 수 있다. 이는 아파트 벽과 같은 경우에는 1층에서부터, 최상층까지 기본적으로 벽체의 규격이 비슷하고 시공방법이 거의 동일하기 때문에 반복에 의한 생산으로 PC공법의 적용시 장점이 높아지기 때문이다.

이와 같은 측면에서, 새로운 형태의 PC구조벽 시스템을 개발시 비교를 위한 RC구조벽의 성능을 정립해 둘

* 한국교통대 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, syseo@ut.ac.kr)

이 연구는 2022년도 한국교통대학교의 지원에 의한 결과임.

필요가 있다. 하지만 이와 같은 필요에 비하여 이에 대한 연구는 아직 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 구조벽에 대해서 국내외 각 지침에서 정하고 있는 성능과 관련된 평가 프로세스 및 해석시 고려하는 입력값들의 적정성을 파악하고 프리캐스트 콘크리트 벽체에 요구되는 기본적인 성능을 파악하고자 한다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구의 목적은 지진과 같은 수평력을 받는 PC구조벽의 구조성능을 정립하는 것이다. 이를 위하여 첫째, 기존 설계지침에서 정의된 RC구조벽의 구조성능 파악, 둘째 기본 휨이론을 적용한 RC구조벽의 횡변위성능의 규명, 셋째 PC구조벽이 RC구조벽에 대응되는 동등성능을 확보하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 연구의 진행은 기존의 국내 설계 지침에 대한 분석을 토대로, 벽식구조의 기본적인 거동을 단순한 이론적 접근을 통하여 파악하고 비교 분석한다.

2. RC 구조벽에 대한 요구성능

2.1 국내 설계지침의 RC 구조벽 구조성능 (KCI & AIK, 2020)

한국콘크리트학회와 대한건축학회에서 공동으로 집필한 “철근콘크리트 건축구조의 성능기반설계를 위한 비선형해석모델” (2020)에서는 철근콘크리트 구조의 성능설계를 위한 해석모델링 방법을 정하고 있다. 기본적으로 이 지침은 ASCE/SEI 41-17 (2017)의 내용을 기반으로 하고 있다. 이 지침에서 정하고 있는 벽체의 기본적인 구조성능은 다음과 같다.

2.1.1 벽체의 거동 구분

전단강도에 도달하기 이전에 휨항복이 선행하는 휨지배 벽체와 휨항복이 발생하기 이전에 전단항복이 선행하는 전단지배 벽체로 구분한다. 특히 전단지배 벽체는 압축력이 $0.15A_g f_{ck}$ 이하인 경우에는 변형지배, 그 이외의 경우로 구분한다. 수직으로 연속된 균일 단면의 벽체에서는, 일반적으로 높이-길이비가 $h_w/l_w > 3.0$ 인 경우, 휨지배 거동으로 가정하고, $h_w/l_w < 1.5$ 인 경우 전단지배 거동으로 가정할 수 있다.

2.1.2 휨지배 벽체의 거동모델 및 허용기준

휨지배 벽체는 선형탄성모델을 적용하거나 취성 전단 모델을 적용한다. 이 경우 Table 1의 소성변형각 허용기준을 모두 만족하여야 한다. Table 1에서 특수 경계부재 (Special Boundary element)는 콘크리트구조 설계기준 (KDS 14 20 80) 4.7.6에 따른 횡보강근을 만족하는 경계부재를 말한다. 완화된 상세 (Relaxed detail)는 경계부재

횡철근이 콘크리트 구조설계기준 요구량의 50%이상이고 횡철근의 간격이 벽두께의 1/3이하 또는 대안상세를 사용하여 실험으로 성능이 검증된 경우를 의미한다.

Table 1. Acceptance criteria for the case controlled by flexure (KCI & AIK, 2020)

Condition			Acceptance criteria ⁺ (plastic rotation, rad)		
Special boundary element	Axial force ratio [*]	Shear force ratio [#]	I.O.	L.S.	C.P.
Exist	≤ 0.1	≤ 0.33	0.005	0.015	0.020
		$0.5 \leq$	0.004	0.01	0.015
	$0.25 \leq$	≤ 0.33	0.003	0.009	0.012
		$0.5 \leq$	0.0015	0.005	0.010
Relaxed detail	≤ 0.1	≤ 0.33	0.004	0.012	0.006
		$0.5 \leq$	0.003	0.008	0.012
	$0.25 \leq$	≤ 0.33	0.002	0.0072	0.0096
		$0.5 \leq$	0.0012	0.004	0.008
None	≤ 0.1	≤ 0.33	0.002	0.008	0.015
		$0.5 \leq$	0.002	0.006	0.01
	$0.25 \leq$	≤ 0.33	0.001	0.003	0.005
		$0.5 \leq$	0.001	0.002	0.004

⁺ I.O.: Immediate Occupancy, L.S.: Life Safety, C.P.: Collapse Prevention

$$^* \text{Axial force ratio} = \frac{(A_s - A_s')f_y + P}{V_i}$$

$$^{\#} \text{Shear force ratio} = \frac{t_w l_w f_{ck}}{t_w l_w \sqrt{f_c'}}$$

2.1.3 전단지배 벽체의 허용기준

압축력이 $0.15A_g f_{ck}$ 이하인 경우에 한하여, 연성 전단모델과 Table 2의 모델링 변수를 적용할 수 있다. 압축력이 $0.15A_g f_{ck}$ 를 초과하는 전단지배 벽체의 전단거동은 선형탄성모델을 적용하거나 취성전단모델을 적용한다.

Table 2. Acceptance criteria for the case controlled by shear (KCI & AIK, 2020)

Axial force ratio [*]	Acceptance criteria ⁺ (plastic rotation, rad)		
	I.O.	L.S.	C.P.
≤ 0.05	0.40	1.5	2.0
$0.05 <$	0.40	0.75	1.0

⁺ I.O.: Immediate Occupancy, L.S.: Life Safety, C.P.: Collapse Prevention

$$^* \text{Axial force ratio} = \frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f_{ck}}$$

Table 1과 2에서 허용기준으로서, 즉시거주 한계 (I.O.), 인명안전 한계 (L.S.), 붕괴방지 한계 (C.P.)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 항복이후 최대내력에 도달하는 구간 (BC 구간)에 위치한다.

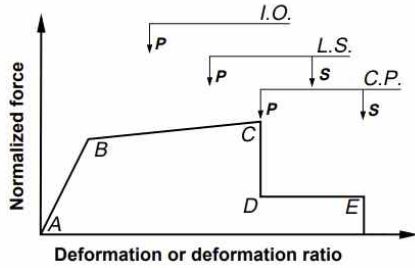


Fig. 1 Component or element deformation limits

2.2 ACI 550.6의 구조벽에 대한 변위성능 (2019)

ACI 550.6은 비부착 포스트텐서닝 PC 구조벽에 대한 성능기준을 정의하고 있다. 이 기준은 실험을 통하여 벽체의 성능을 규명할 때, RC 구조벽과 동등한 구조성능을 보유하고 있음을 평가할 수 있도록 벽체에 요구되는 최소한의 구조성능을 정하고 있다. 벽체 실험에서 임의 변위비에서 반복사이클 횟수는 3회이다. Fig. 2는 실험을 통하여 얻은 특수구조벽의 하중-변위 관계 곡선으로서, 최대하중을 지나 20% 내력이 저하된 지점을 벽체의 파괴로 보고 이때의 변위비가 한계 변위비가 된다. 특수구조벽은 벽체의 형상비에 따라 이 한계변위비가 변하며, Eq. (1)과 같이 정하고 있다.

$$0.9 \leq \frac{\delta_f}{h_w} = 0.8 \left[\frac{h_w}{l_w} \right] + 0.5 \leq 3.0 \quad (1)$$

여기서, δ_f = 파괴하중에서의 횡변위, h_w = 벽체의 높이, l_w = 벽체의 길이.

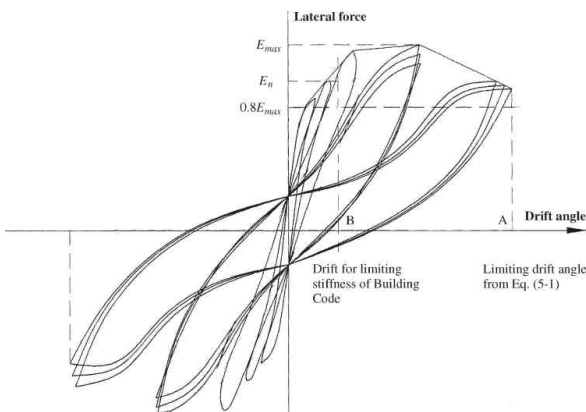


Fig. 2 Experimental load-displacement curve of special precast concrete walls under cyclic loads

2.3 ACI 550.6의 구조벽에 대한 변위성능 (2019)

ACI 374.2R은 완전한 가력속도로 지진실험을 실시하여 철근콘크리트 구조부재의 성능을 평가하기 위한 기준이다. 이 기준에서는 임의 변위비에서 2사이클의 반복가력을 최소조건으로 하고 있어, ACI 550.6에 비하여 사이클 횟수가 작다. 또한 실험을 통하여 얻은 하중-변위관계에서 부재의 성능을 평가하기 위한 허용 변위성능을 붕괴방지수준 즉 최대하중시까지 (Fig. 1의 C점)로 정하고 휨 또는 전단지배 거동에 따라 Table 3과 4의 C.P.수준의 변형성능을 만족하도록 하고 있다. Table 3과 4의 허용 변형값은 FEMA 356에 정의된 성능요구값과 동일하다. 즉 각 응력조건에 따라 구조벽체로서 최소한으로 요구되는 성능이다.

Table 3. Acceptance criteria for the case controlled by flexure (ACI 374.2R)

Shear walls and wall segments			Acceptable plastic hinge rotation (rad)		
$\frac{(A_s - A_s')f_y + P}{t_w l_w f'_c}$	$\frac{V_i}{t_w l_w \sqrt{f'_c}}$	BC	I.O.	L.S.	C.P.
≤ 0.1	≤ 3	Yes	0.005	0.010	0.015
≤ 0.1	≥ 6	Yes	0.004	0.008	0.010
≥ 0.25	≤ 3	Yes	0.003	0.006	0.009
≥ 0.25	≥ 6	Yes	0.0015	0.003	0.005
≤ 0.1	≤ 3	No	0.002	0.004	0.008
≤ 0.1	≥ 6	No	0.002	0.004	0.006
≥ 0.25	≤ 3	No	0.001	0.002	0.003
≥ 0.25	≥ 6	No	0.001	0.001	0.002

I.O.: Immediate Occupancy, L.S.: Life Safety, C.P.: Collapse Prevention

Table 4. Acceptance criteria for the case controlled by shear (ACI 374.2R)

Shear walls and wall segments	Acceptance drift (%) or Chord rotation (rad)		
	I.O.	L.S.	C.P.
All case	0.40	0.60	0.75

I.O.: Immediate Occupancy, L.S.: Life Safety, C.P.: Collapse Prevention

2.4 휨지배인 구조벽에 대한 변위성능 (Seo et al. 2000)

철근콘크리트 구조벽은 휨에 의한 거동이 지배적인 경우가 많다. 휨이 지배하는 경우에 벽체가 충분한 성능을 확보하기 위해서는 전술한 허용기준에서 정의된 바와 같이 요구되는 수준에 따라 벽체가 변형할 수 있는 성능을 보유하고 있어야 한다. 이와 같은 성능은 Fig. 3과 같이

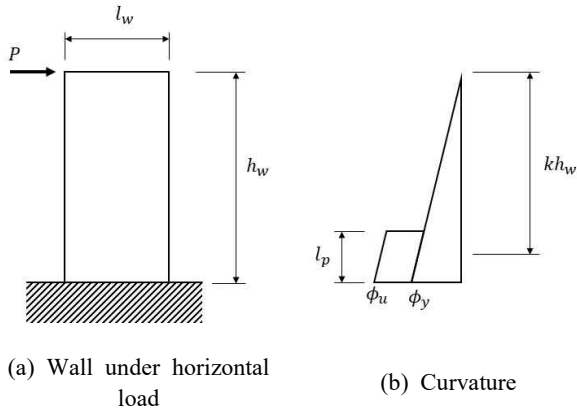


Fig. 3 Curvature of wall under horizontal load

벽체의 휨거동을 표현할 수 있는 단순한 이론 모델을 이용하여 평가할 수 있다. Seo 등 (2000)은 이 휨이론과 이용하여 휨력에 의해 휨거동이 지배되는 구조벽의 변위성능을 다음과 같이 나타내었다.

$$\delta_u = \delta_y + \theta_p h_w \quad (2)$$

$$= \frac{1}{3}(\phi_y h_w^2) + (\phi_u - \phi_y) l_p k h_w \quad (3)$$

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} = 1 + \frac{(\phi_u - \phi_y) l_p k h_w}{\frac{1}{3}(\phi_y h_w^2)} \quad (4)$$

$$\phi_u = \frac{(\mu_\delta - 1) h_w^2}{3 l_p k h_w} \phi_y + \phi_y \quad (5)$$

여기서, $l_p = \alpha l_w$, $\phi_y = \frac{l_w}{\beta}$ 로 나타내면,

$$\delta_u = \frac{1}{3} \left(\frac{\beta}{l_w} h_w^2 \right) + \left(\phi_u - \frac{\beta}{l_w} \right) \alpha l_w k h_w \quad (6)$$

따라서 최대하중에서의 변위비는 Eq. (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\delta_u}{h_w} = \frac{\beta \mu_\delta}{3} \left(\frac{h_w}{l_w} \right) \quad (7)$$

최대하중이후 부재 파괴시, 즉 최대하중에서 20%내력이 저하되었을 때의 변위비는 Eq. (8)과 같게 된다.

$$\frac{\delta_f}{h_w} = \frac{\beta \mu_\delta}{3} \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + c \quad (8)$$

여기서, δ_u = 최대하중에서의 휨변위, δ_y = 휨에 의한 항

복변위, θ_p = 소성회전각, ϕ_y = 항복 곡률, ϕ_u = 최대하중에서의 곡률, l_p = 소성힌지 길이, μ_δ = 최대하중에서의 변위 연성비, β = 항복곡률과 벽체 유효깊이의 관계를 나타내는 계수, δ_f = 파괴하중에서의 휨변위, c = 최대하중 이후 파괴시까지의 변위비

식(8)로부터, 변위연성비 μ_δ , 계수 β 와 c 를 알게 되면, 휨거동이 지배하는 경우 벽체의 한계 변위비를 구할 수 있다. NZS 4203에서는 연성적인 거동을 하는 벽체에 대하여 제시한 8을 μ_δ 값으로 하고, β 값으로서 0.003을 적용하여 Seo 등의 연구에 의해 제안된 최대하중 이후 약 0.5%정도의 추가변위비를 고려하면, Eq. (9)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\delta_f}{h_w} (\%) = 0.8 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) + 0.5 \quad (9)$$

이 결과는 ACI 550.6에서 제시한 Eq. (1)과 동일함을 알 수 있다.

3. PC구조벽에 대한 구조성능

PC 구조벽체가 적용되는 구조에서는 벽체들이 연결되는 부분을 접합부라하고 이 접합부에서의 연결상태에 따라 전체적인 구조의 거동이 달라지게 된다. 수직접합부의 고정도가 높을 경우 수직접합부로 연결된 두 개 벽체는 한 개의 벽체처럼 거동을 하지만, 수직접합부의 고정도가 낮을 경우에는 두 개 벽체는 독립된 벽체처럼 거동을 하게 된다. 설계의 의도에 따라 이 접합부의 고정도를 고려한 설계가 가능하지만 기본적으로 PC구조가 RC구조와 동등한 구조성능을 가지기 위해서는 접합부의 강도와 강성이 벽체에 비하여 높게 되어야 한다.

PC구조는 접합부의 상세에 따라, 다양한 형태의 접합부가 형성될 수 있기 때문에 확립적으로 강도와 강성이 확보되도록 하는 일반적인 강도설계방법을 적용하기 어렵다. 따라서 최근 적용하는 방법은 구조실험을 통하여 RC구조의 성능이상의 성능을 보유하고 있는지를 확인하는 것이다. 즉, 전술한 RC 구조벽의 기본적인 성능을 만족하는 것을 실험을 통하여 입증할 경우, 이 PC구조는 동일한 구조성능을 가진 RC구조를 대신하여 사용될 수가 있다. 특히 강진지역의 구조물, 특히 특수전단벽 구조의 경우에는 RC구조벽과 비교하여 동등이상의 성능이 요구되기 때문에 전술한 RC구조벽에 요구되는 성능이 PC구조벽에 요구되는 성능이 된다. Eq. (1)을 이용하여 붕괴시까지의 RC구조벽의 변위성능을 정의하고 PC구조벽이 그 이상의 성능을 가지고 있음이 확인된다면 이 PC구조벽은 강진지역에 사용될 수가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지진과 같은 수평력을 받는 PC구조벽의 구조성능을 정립하기 위하여, 기존 설계지침에서 정의된 RC구조벽의 구조성능을 파악하고 기본 휨이론을 적용한 RC구조벽의 횡변위성능 규명을 통하여 PC구조벽이 RC구조벽에 대응되는 동등성능을 확보하기 위한 방안을 연구하였다. 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 국내 설계지침과 국외 지침에서 정하고 있는 붕괴방지수준의 한계변위비는 실제 부재가 나타내는 하중-변위 관계에서 최대하중시의 변위비를 근거로 하고 있어 실제 부재의 파괴로 정의되는 최대하중이후 20%내력이 저하된 값과 차이가 있다. 따라서 성능한계를 설정시에는 이와 같은 차이를 고려할 필요가 있다.

2) 벽식구조의 기본적인 거동을 소성힌지가 형성되는 휨거동을 기반으로 하여 이론적으로 평가한 결과, ACI 374.2R에서 제시한 한계변위각과 일치되는 결과를 도출하였다.

3) 실험을 통하여 PC구조벽이 RC 구조벽대비 동등이상의 구조성능을 확보하고 있음을 평가하기 위한 방안으로 ACI 550.6-19와 본 연구의 휨이론에 의한 한계 변위비를 적용할 수 있다. 다만 이는 축응력, 철근비, 재료 강도 등과 같은 다양한 변수를 고려하지 않았기 때문에 보다 상세한 성능을 평가하기 위해서는 이들 변수들의 영향을 추가적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. ACI Innovation Task Group 5 (2019). *Acceptance criteria for special unbonded post-tensioned precast structural walls based on validation testing and commentary*, ACI 550.6-19, American Concrete Institute.
2. ACI Committee 374 (2013). *Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads*, ACI 374.2R-13, American Concrete Institute.
3. ASCE (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, ASCE/SEI 41-17.
4. AIK (2021). *Nonlinear analysis model for performance based seismic design of RC building structures*, AIK-B-2021-001, Architectural Institute of Korea.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021). *Design code for seismic design of concrete*, KDS 14 20 80.
6. Seo, S.-Y., Lee, L.-H.; & Hawkins, N. M. (1998), The limiting drift and energy dissipation ratio for shear walls based on structural testing, *Journal of the Korean Concrete Institute*, 10(6), 335-343.