국내 프리캐스트 콘크리트 건축구조물의 연쇄붕괴저항 성능분석

김 성 현¹·강 준 희²·황 현 종³·최 하 진⁴·강 수 민^{5†}

¹서울대학교 건설환경종합연구소 연수연구원, ²송실대학교 건축학부 석사과정, ³건국대학교 건축학부 조교수,
⁴송실대학교 건축학부 조교수, ⁵송실대학교 건축학부 부교수

Progressive Collapse Resistance Analysis of Precast Concrete Building Structures in Korea

Sung-Hyun Kim¹, Joon-Hee Kang², Hyeon-Jong Hwang³, Ha-Jin Choi⁴ and Su-Min Kang^{5†}

¹Researcher, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Graduate Student, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

³Assistant Professor, School of Architecture, Konkuk University, Seoul, 05029, Korea

⁴Assistant Professor, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

⁵Associate Professor, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

Abstract

Recently, use of the precast concrete (PC) system, which can increase economy by minimizing field work, has rapidly increased. However, the PC system cannot exhibit structural performance under construction, specifically before integration between members. Furthermore, since it is difficult to secure the structural integrity of beam-column joints even after construction, the PC system is vulnerable to progressive collapse. In the PC system, various types of details for PC beam-column joints have been proposed, while the structural/construction details of PC system generally used in Korea differ from those of overseas PC systems. However, studies on the progressive collapse of the domestic PC system are limited. Thus, in this study, we investigated the structural/construction details of PC beam-column joints mainly used in Korea. Based on the investigation, for the prototype PC system with typical joint details, a nonlinear finite element analysis was carried out to evaluate its structural performance under progressive collapse. Further, a parametric study was performed, and the effect of the design parameters was investigated, to recommend a method to improve the progressive collapse resistance of the PC system.

Keywords : PC system, progressive collapse resistance, nonlinear finite element analysis, structural design, beam-column joint

1. 서론

국내 건설환경 변화에 따라 건축물 건설현장에서 노동력 및 공사비 절감, 시공 환경 개선 및 공기단축에 대한 수요가 급증하고 있다. 이로 인하여 최근 현장작업을 최소화하여 건설환경의 변화에 대응할 수 있는 PC(Precast Concrete) 건축공법의 적용이 급속하게 활성화되고 있다(Han and Yoo, 2020; Yoo and Kim, 2006; Yoo and Oh, 2020). 그러나 PC 공법은 시공 중, 특히 부재간 일체화 이전에 구조적 성능을 발휘하기 어렵고 완공 후에도 접합부의 일체성을 확보하기 어려운 측면이 있어 연쇄붕괴에 취약하다고 할 수 있다.

2006년 이후로 전 세계적으로 발생한 126,000건 이상의 테러 활동은 건물 및 사회기반시설을 손상시켰다(Global Terrorism Database, 2018). 테러, 폭발, 충돌사고, 재난 등에 의한 건물의 붕괴를 방지하기 위하여 해외에서는 2008년 이후로 연쇄붕괴 연구가 급격히 증가하였다(Adam *et al.*, 2018). 특히, 연쇄붕괴에 취약한 PC 건축물의 경우 PC 모멘트 프레임의 연쇄붕괴 저항성능을 평가하기 위해 구조물 전체 또는 일부에 대하여 정적 및 동적하중 실험 연구가 활발히 이루어지고 있다(Feng *et al.*, 2020). 그러나 PC 건축물에서는 PC 부재간 접합을 위하여 매우 다양한 접합 상세가 존재하며, 국내의 구조/시공 상세가 현격히 다르다. PC 구조시스템의 연쇄붕괴 저항성능은 PC 접합

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-820-0665; E-mail: kangsm@ssu.ac.kr

Received October 29 2021; Revised November 6 2021;

Accepted November 8 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1 One-way prestressed PC system(Baek *et al.*, 2020)

부의 상세와 일체성에 큰 영향을 받으므로 국내에서 주로 사용하는 상세를 적용한 PC 구조시스템에 대한 연쇄붕괴방지 연구가 수행될 필요가 있다고 할 수 있다. 하지만, 국내의 건축구조물에 대한 연쇄붕괴방지 연구는 주로 전통적인 현장타설 철근콘크리트 RC 구조나 철골시스템에 국한되고 있으며 연쇄붕괴에 취약한 국내 PC 시스템에 대한 연구는 매우 미비하다(Jeon *et al.*, 2015; Jung and Lee, 2020; Kim *et al.*, 2007; Kang and Oh, 2013; Kang and Kim, 2014; Kim and Wee, 2014; Kim and Ahn, 2014; Kim *et al.*, 2014; Na *et al.*, 2021).

따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 PC 구조시스템과 접합부 구조/시공 상세를 사례조사를 통하여 분석하였다. 또한 국내에서 사용되는 전형적인 PC 구조시스템의 유형을 설정하고 상기 PC 구조시스템의 연쇄붕괴방지 성능을 평가하기 위하여 비선형 유한요소해석을 실시하였다. 최종적으로 상기 해석결과 분석하여 국내에서 주로 사용된 PC 구조시스템의 연쇄붕괴방지 성능을 평가하고 구조설계시 고려사항을 제안하였다.

2. 국내 PC 시스템분석

본 연구에서는 최근 국내 구조설계 사례를 통해 국내 PC건축구조시스템의 구조형식과 구조상세를 조사 분석하였다. 최근에는 공기단축과 공사비 절감을 위해 PC 구조시스템의 적용사례가 상당히 증가되고 있는데, 특히 평면형식이 정형화되어 있어 PC 구조를 적용할 경우, 생산과 시공에 장점을 가지는 모듈형 건축물(예를들어, 지하주차장, 물류센터, 공장 등)에

PC 구조시스템의 적용이 일반화되고 있다. 특히, PC 시스템에서 가장 큰 물량을 차지하는 PC 슬래브와 PC보에 포스트텐션닝을 도입하여 전체적인 물량을 줄일 수 있는 1방향 프리스트레스트 시스템의 도입이 점차 일반화되고 있다(Fig. 1참조)(Baek *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2015; Jang *et al.*, 2021). 다만, 이러한 1방향 프리스트레스트 시스템 적용에 있어 연쇄붕괴방지 성능에 가장 큰 영향을 미치는 보-기둥 접합부에서 보의 접합형식이 시스템별로 큰 차이를 보이며, 이를 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 시공성 향상을 위해 보 접합을 단순 지지조건을 사용하고 두 번째로는 구조적 성능을 위해 보 접합을 연속지지조건(강접합조건)을 사용한다. 이를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다.

2.1 1방향 프리스트레스트 시스템 - 접합부 단순조건

Fig. 2와 Fig. 3은 PC 구조시스템을 도입한 전형적인 물류센터 건축물의 구조단위평면과 구조단위부재 상세를 나타낸다. Table 1은 상기 구조시스템에 사용된 재료물성치를 나타낸다.

Fig. 2는 1방향 프리스트레스트 시스템 단순조건 접합부의 단위 모델로 보의 경간은 12m, 보를 잇는 슬래브는 11m로 장경간 구조를 나타낸다. 보의 단면 크기는 1200 × 1200mm이며, 기둥의 단면으로 크기는 1100 × 1200mm이다(Figs. 3(a),(b)). Fig. 3(c)는 연쇄붕괴방지 성능에 큰 영향을 미치는 보와 기둥의 접합부 상세를 나타내며, 보를 기둥의 브라켓에 올려놓은 단순접합으로 되어있다. 단순지지조건이 고려되지만, 구조적 안전성을 고려하여 기둥-슬래브 연결철근이 후타설 토폰콘크

Fig. 2 Unit plan of one way prestressed system (simple support PC beam-column connection)

Table 1 Material properties for PC systems

	Members(MPa)			
	PG1-1(1200 by 1200mm)		PC1(1100 by 1200mm)	
Simple	PG1-1(1200 by 1200mm)		PC1(1100 by 1200mm)	
Continuous	PG1-1(1200 by 1000mm)		PC1(1100 by 1000mm)	
Concrete	PC	RC	PC	
f'_c	45	24	35	
f'_{ci}	30	-	-	
Rebar	>D19	≤D16	Vertical bar	Hoop bar
f_y	600	500	600	500
f_{pu}	1860		-	

리트 내부에 일부 배근된다. 또한 PC 기둥 브라켓에 앵커를 선 설치하여, PC 보 시공시 상기 앵커를 너트로 체결하고 PC 보의 시공중 안정성을 확보한다. 다만, 상기 앵커는 건식부재만을 연결하며, 토핑콘크리트 내부에 설치된다. 이와 같이 국내에서 사용되는 단순지지접합 상세는 상당한 현장타설 토핑콘크리트의 사용, 토핑콘크리트 내에 존재하는 앵커 등 독특한 형태를 나타내며, 이는 연쇄붕괴저항 성능에 상당부분 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2.2 1 방향 프리스트레스트 시스템- 접합부 연속조건

Fig. 4와 Fig. 5는 PC 보-기둥 접합에 있어 보단부의 모멘트를 전달할 수 있게 구성된 PC 모멘트 프레임 구조시스템을 도입한 전형적인 물류센터 건축물의 구조단위평면과 구조단위부재 상세를 나타낸다. Table 1은 상기 구조시스템에 사용된

Fig. 4 Unit Plan of one way prestressed system (Continuous PC beam-column connection)

재료물성치를 나타내고 있다. 상기 구조시스템은 물류센터뿐만 아니라 지하주차장에도 일반적으로 적용되는 구조시스템이라고 할 수 있다. Fig. 4는 1방향 프리스트레스트 시스템 연속조건 접합부의 단위 모델로 보의 경간은 10m, 보를 잇는 슬래브는 12m로 장경간 구조를 나타낸다. 보의 단면 크기는 1200 × 1000mm이며, 기둥의 단면 크기는 1100 × 1000mm이다(Figs. 5(a),(b)). 상기 구조시스템이 지하주차장에 적용된 경우에는 상세는 거의 동일하나 경간이나 부재 사이즈 등이 다소 줄어든다.

Fig. 5(c)는 보와 기둥의 일체성을 향상시키고 모멘트를 전달시키기 위한 보-기둥 접합부 상세를 나타낸다. 부모멘트 전달을 위해 PC 보 상부철근은 보-기둥 접합부에서 연속적으로 배근된다. PC보 하부철근은 갈고리 상세를 적용하여 접합부 내에서 정착된다. 또한, PC 보 시공중 안전성을 높이기 위하여 기둥 브라켓에 앵커가 사용된다. 접합부 일체성 확보를 위하여 접합부와 보 상부에 상당한 양의 현장타설 토핑콘크리트를 타설한다. 이러한 접합부의 일체화 상세는 Fig. 3의 단순지지된 접합부 상세와는 달리 향상된 연쇄붕괴저항 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

3. 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴저항성능 분석

본 연구에서는 국내 PC 시스템에 대하여 연쇄붕괴 시 성능을

Fig. 3 Details of PC members (simple supported PC beam-column connection)

Fig. 5 Details of PC members(continuous PC beam-column connection)

검토하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 비선형 유한요소 해석 수행을 위해 Cervenka Consering 사의 ATENA (Vladimir *et al.*, 2018)를 사용하였다. 앞서 조사한 전형적인 국내 PC 시스템의 부재 및 접합부 상세를 참고하여 비선형 유한요소해석 모델을 수립하였다. 해석모델에 대한 상세 설명은 다음과 같다.

3.1 해석 모델 및 단면 상세

Fig. 6은 해석모델의 구성을 나타낸다. 해석 대상 골조는 2경간 대칭형 골조시스템이다. 층고는 10m, 기둥 간의 중심간격은 12m, 순경간은 10.8m이다. 골조시스템은 PC 보, RC 토핑 콘크리트, PC 기둥, 브라켓으로 구성되며, 슬래브는 고려하지 않았다. 각 부재의 크기와 철근 배근 상세는 Fig. 3의 실제 PC 부재의 상세를 참고하여 결정하였다.

PC 보의 단면 크기는 1200 × 800mm이고, RC 토핑 콘크리트의 단면 크기는 1200 × 400mm이다. 실제 PC 시스템에서는 PC 보가 요철이 있는 단면이나, 해석모델에서는 단순화를 위하여 등가의 직사각형 단면을 사용하였다. PC 보의 하부철근은 10개의 D32 철근을 사용하였고 상부철근은 6개의 D22 철

근을 사용하였다. 또한 프리스트레스 하중 도입을 위하여 30개의 φ15.2 긴장재를 사용하였다. 각 긴장재의 긴장력은 191.0kN이며 프리스트레스 하중에 의해 콘크리트에 작용하는 평균압축응력은 6.0MPa이다. RC 토핑의 상부 철근으로 4개의 D25 철근을 사용하였다. PC보의 스티럽은 D13철근 + D16철근을 사용하였고 150mm 간격으로 배치하였다. 접합부 형식에 따라 보의 상·하부 철근은 정착 방식을 다르게 하였다. 단순지지 조건의 경우 상·하부 철근 모두 접합부를 관통하지 않고 보 내부에 정착하였다. 연속조건의 경우 상부 철근은 접합부를 관통하여 연속되게 하였고, 하부철근은 접합부에서 90° 후크 정착하였다.

PC기둥의 크기는 1100 × 1200mm이다. 기둥의 수직철근으로 26개의 D32철근을 사용하였고, 띠철근으로 D10철근을 단부에 100mm 간격, 중앙부에 200mm 간격으로 사용하였다.

브라켓의 내민 길이는 250mm 이다. PC보는 브라켓과 절점을 공유하지 않도록 모델링하고 앵커 볼트를 사용하여 고정하였다. PC보와 브라켓 사이의 마찰력과 지압력을 고려하기 위해 Interface 요소를 사용하였다. 브라켓의 주 인장 철근으로 9개의 D32철근을 사용하였고 전단철근으로 D16 철근을 60mm

Fig. 6 Configuration of prototype model

간격으로 배치하였다. 앵커볼트는 D19 철근을 사용하였다.

3.2 경계 조건 및 하중 재하 모델

경계 조건 모델링은 Fig. 6에 나타났다. 기둥 하부에는 탄성 받침을 두고 고정단 지지조건을 정의하였다. 실제 건물에서는 경간 방향으로 연속된 골조에 의하여 해석 대상 골조가 횡지지 된다. 이러한 조건을 모사하기 위하여 2경간의 탄성 골조를 해석 대상 골조와 연결하였다. 해석 대상 골조의 대칭성을 고려하여 골조의 1/4을 모델링하고 대칭 경계조건을 사용하여 전체 골조를 모사하였다.

PC 골조의 연쇄붕괴 해석을 위하여 하중 재하는 두 단계로 나누어서 적용하였다. 먼저 PC 보에 프리스트레스 하중을 하중 제어 10단계에 걸쳐 적용하였다. 다음으로 내부 기둥이 파괴되어 붕괴되는 상황을 고려하여 수직 변위를 내부 기둥의 중심 절점에 변위 제어로 적용하였다. 목표 변위는 1m이며 100단계에 걸쳐 적용하였다.

3.3 유한요소 모델 및 재료모델

Fig. 7은 사용한 유한요소 모델을 나타낸다. 콘크리트는 8절점의 3D solid 모델을 사용하였으며, 철근은 2D line truss 모델을 사용하였다. 앵커 볼트는 1축 인장, 압축뿐만 아니라 다우얼 거동에 의한 휨과 전단에 저항을 할 수 있도록 3D solid 모델

을 사용하였다. 또한, PC 보와 브라켓 사이의 마찰력과 지압력을 모사하기 위하여 Interface 요소를 사용하였다.

Fig. 8은 콘크리트의 재료모델을 나타낸 것으로 콘크리트의 응력-변형률 관계는 주응력 축에 대한 등가 단축 응력-변형률 관계에 의해 정의하였다. 콘크리트의 압축응력은 2축 응력 상태를 고려하여 정의하였다. 인장-압축응력 작용 상태에서는 인장 균열에 의한 콘크리트의 압축연화 현상(Compression softening)을 고려하였으며, 콘크리트의 인장 강도 도달 이후 철근의 부착에 의한 인장 강화(Tension stiffening)를 고려하였다. 철근과 콘크리트는 완전 부착으로 가정하였으며, 고정 균열각 모델(Fixed cracking model)을 적용하였다.

콘크리트의 압축에 대한 단축 응력-변형률 관계는 CEB-FIP Model Code 90(Comittee Euro-International du Beton, 1990)의 식을 사용하였으며, 다음과 같다.

$$\sigma_c = f'_c \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x} \quad (1)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트의 압축응력, f'_c 는 콘크리트의 압축강도, x 는 변형률 비($x = \varepsilon_c / \varepsilon_{co}$, ε_c = 압축 변형률, ε_{co} = 압괴 변형률 = 0.002), k 는 형상 계수이다.

콘크리트의 압축강도 f'_c 은 PC 기둥에 대하여 49MPa, PC 보에 대하여 40MPa, RC 토핑에 대하여 27MPa를 사용하였다. 콘크리트의 압축강도 도달 이후에는 기율기 E_d 에 따라 압축응력이 선형적으로 감소한다.

(a) 8-nodes 3D solid element

(b) 2D line truss element

(c) Interface element

Fig. 7 Element models

(a) Uni-axial compression

(b) Biaxial failure function in concrete

(c) Exponential crack opening law

Fig. 8 Concrete models

다축 응력 상태 하에서 콘크리트 압축강도는 응력 성분의 상호작용에 의해서 정의되었다. 압축 파괴기준으로서 2축 응력 파괴 기준이 적용되었다(Fig. 8(b) 참조). 압축-압축 응력 작용 상태에서 파괴기준은 다음과 같이 정의된다.

$$f_c'^{ef} = \frac{1 + 3.65(\sigma_{cl}/\sigma_{c2})}{(1 + \sigma_{cl}/\sigma_{c2})^2} f_c' \quad (2)$$

여기서, $f_c'^{ef}$ 는 유효 압축강도, σ_{cl} , σ_{c2} 는 주응력이다.

인장-압축 응력 상태에서 압축강도는 주인장 응력에 의해 다음과 같이 감소한다.

$$f_c'^{ef} = f_c' + 5.3278\sigma_{cl} \quad (3)$$

여기서, 주인장 응력 σ_{cl} 은 양의 값이고, 압축강도 f_c' 은 음의 값이다.

콘크리트의 인장강도는 $f_t = 0.24f_c'^{2/3}$ 으로 정의하였으며, 인장 강도 도달 이후 인장응력은 파단 에너지 계수 G_f 에 의해 감소한다(Fig. 8(c) 참조).

철근의 응력-변형률 관계는 이선형 탄-소성 모델로 가정하였으며, 보수적인 평가를 위하여 철근의 강도 경화 현상(Strength hardening)은 고려하지 않았다. 철근의 항복강도는 D16 이상 철근에 대하여 600MPa, D13 이하 철근에 대하여 500MPa를 사용하였으며, 철근의 탄성 계수는 200,000MPa로 정의하였다.

PC 보와 브라켓 사이의 Interface에는 지압과 마찰에 대한 재료 모델을 정의하였다. PC 보는 브라켓 위에 단순히 올려져 있으므로 Interface의 지압에 대한(계면의 법선 방향) 재료모델은 압축에는 탄성으로 저항하고 인장강도는 0으로 정의하였다. 마찰에 대한(계면의 접선방향) 재료모델은 기존 연구(Zhou *et al.*, 2019)를 참고하여 마찰계수 0.4를 적용하였다.

4. 비선형 유한요소해석 모델 검증

비선형 유한요소해석 모델은 기존 연쇄 붕괴 실험 결과(Zhou *et al.*, 2019)와 해석결과를 비교하여 검증하였으며, 실험체에 대한 설명 및 검증 내용은 다음과 같다.

4.1 기존 연쇄 붕괴 실험체

Fig. 9는 기존 연쇄 붕괴 실험체의 상세를 나타낸다. 실험체는 2경간 골조이며, 1층 내부 기둥 파괴를 가정하여 양쪽 기둥의 하부는 고정단으로 지지되었으며, 내부 기둥 상부에서 정적 하중이 가력되었다. 실험체의 기둥 높이는 1800mm, 기둥 중심간 경간은 3000mm, 순경간은 2650mm, 보 단면은 200 ×

Fig. 9 Details of specimen(Zuo *et al.*, 2019)

300mm, 기둥의 단면은 350 × 350mm이다. 보의 상부 및 하부 철근은 2개의 직경 18mm 철근을 사용하였고, 6mm 직경 스티럽을 50mm 간격으로 배치하였다. 기둥의 수직철근은 8개의 직경 16mm 철근을 사용하였고 6mm 직경 띠철근을 50mm 간격으로 배치하였다. RC 골조 실험체의 경우 보의 상·하부 철근이 접합부를 관통하여 연속 배근되었다. PC 골조 실험체의 경우 브라켓 위에 PC 거더를 올리고 앵커볼트와 강재 앵글을 사용하여 고정하였다. 앵커 볼트는 직경 20mm 철근을 사용하였으며, 브라켓의 내민길이는 200mm이다.

실험체의 콘크리트 강도는 RC의 경우 24.7MPa, PC의 경우 28.3MPa이다. 스티럽과 띠철근에 사용된 6mm 철근은 항복강도 385MPa, 인장강도 460MPa, 보의 상·하부 철근은 항복강도 485MPa, 인장강도 622MPa, 기둥의 수직철근은 항복강도 505MPa, 인장강도 630MPa이다.

연속 골조의 횡지지를 모사하기 위하여 양쪽 기둥 상부는 반곡점 위치에서 횡지지 되었다. 실험 결과, 횡지지 강성은 RC 골조에 대하여 9.06kN/m, PC 골조에 대하여 11.47kN/m로 나타났다.

4.2 실험 결과와 해석 결과의 비교

Fig. 10은 실험 결과와 해석 결과의 비교를 보여준다. RC 골조에서는 보가 항복함에 따라 아치 작용(Compression arch action)에 의하여 첫 번째 최대강도가 119.2kN으로 나타났으며 이때의 수직 변위는 130.9mm였다. 이후 변형이 크게 증가하면서 현수 작용(Catenary action)에 의하여 두 번째 최대강도가 145.3kN으로 나타났으며, 이때의 수직 변위는 613.9mm였다. 반면 PC 골조에서는 아치작용에 의한 첫 번째 강도가 90.9kN, 변위가 100.5mm로 나타났고 현수 작용에 의한 두 번째 강도는 발휘되지 않았다. 그 이유는 PC 접합부에 사용된 앵커 볼트가 조기에 파괴되어 보 길이 방향에 대한 인장력을 전달하지 못하였기 때문이다.

본 연구의 유한요소해석 모델은 이러한 실험 결과를 잘 모사하였다. RC 골조에서는 첫 번째 최대강도는 120.6kN, 수직 변위는 90mm로 나타났다. 이후 두 번째 최대강도는 131.1kN, 수직변위는 630mm이었으며, 철근의 파단에 의해 급격한 강

Fig. 10 Comparison of test results and analysis results

도감소가 발생하였다. PC 골조에서는 수직변위 150mm에서 최대강도가 96.7kN로 나타난 이후 앵커 볼트의 항복에 의해 강도가 감소하였다. 또한 Fig. 10에서 보듯이 해석 모델은 접합부의 균열 및 파괴 양상을 실험결과와 유사하게 예측하였다.

5. 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴저항 성능 해석 결과 및 분석

실험 연구와 비교하여 검증한 해석모델을 국내 PC 시스템에 적용하였다. 변수 연구를 통하여 국내 PC 시스템의 성능 발휘에 영향을 미치는 주요 요인을 조사하였다.

5.1 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴 저항성능

Fig. 11은 국내 PC 골조 시스템의 연쇄 붕괴거동 해석 결과를 보여준다. 국내 PC 골조 시스템의 주요 특징은 1) PC 보를 브라켓에 올린 후 앵커 볼트로 고정, 2) PC 보에 프리스트레스 하중 적용이다. 이는 슬래브의 중력 하중(고정하중 + 활하중)을 기둥으로 전달하는데 경제적이고 효과적이다. 그러나 기둥 붕괴에 따른 연쇄 붕괴 거동 시에는 보 스패인이 두배가 되어 보 양쪽 단부에 요구되는 부모멘트와 내부 보-기둥 접합부에 연결되는 보에 요구되는 정모멘트가 크게 증가한다. 따라서 보 항복시 기둥에 가해지는 수직하중(P_n)은 양쪽 단부의 휨강도를 바탕으로 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$P_n = 2(M_{n1} + M_{n2})/l_n \quad (4)$$

여기서, M_{n1} 은 부모멘트가 작용하는 단부의 휨 강도, M_{n2} 는 정모멘트가 작용하는 단부의 휨강도이고 l_n 은 보의 순경간 길이이다. 프리스트레싱 강연선은 접합부를 관통하지 않아서 프리스트레스 하중은 보의 양 단부에서 유효하지 않으므로 단면의 휨강도 산정시 고려하지 않았다. 이에 따라 산정된 예상 강도는 단순지지 접합부 조건 골조(PCP)에서 $P_n = 1,122\text{kN}$ 연속 접합부 조건 골조(PCC)에서 $P_n = 1,536\text{kN}$ 이다.

Fig. 11 Analysis results of prototype model

단순지지 조건을 고려한 PC 골조 PCP는 수직변위 374mm에서 최대강도가 996kN으로, 기대강도의 0.89배로 작았다. 이는 앵커 볼트가 하중지지보다는 시공 중 PC보 위치 고정을 위해 주로 사용되므로 보 단부의 회전변형 발생시 앵커 볼트의 조기 항복이 발생하였기 때문이다. 이에 따라 아치 작용에 의한 최대 강도 발현 이후 현수 작용이 발생하지 않고 하중재하 능력이 감소하였다. PC보의 철근은 항복하였으나 인장 변형률이 0.005 이하로 작았다. 이는 앵커볼트의 항복 이후 계면의 미끄러짐이 전체 거동에 지배적인 영향을 주었기 때문이다.

연속 접합 조건을 고려한 PC 골조 PCC는 수직 변위 274mm에서 최대강도가 1856kN으로 기대강도보다 1.2배 증가하였다. 최대강도 이후 접합부를 관통하는 상·하부 철근이 항복하여 강도 감소가 발생하였다. 최대 변위 650mm에서 상부 철근이 파단 변형률인 0.25에 도달하였다. 아치 작용에 의한 최대 강도 발현 이후 현수 작용에 의한 강도 증가가 발생하지 않고 하중재하 능력이 감소하였다.

Fig. 11은 또한 PCP와 PCC의 균열 양상 및 파괴 모드를 보여준다. PCP는 접합부를 관통하는 철근이 없고 PC보가 브라켓 위에 단순히 올려져있기 때문에 시공 계면의 채움 모르타르에 인장파괴가 발생하면 접합부를 통해 하중 전달이 불가능하다. 따라서 PC보나 접합부의 손상보다는 시공 계면에 손상이 집중되었다. 반면 PCC는 접합부를 관통하는 철근이 충분히 정착되어 있어 인장항복이 발생하였다. 따라서 PC 보의 인장 영역에서 휨 항복 균열이 주로 발생하였다.

5.2 변수 연구

국내 PC 시스템의 연쇄 붕괴 성능에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하기 위하여 변수 연구를 수행하였다. 설계 변수로 앵커볼트, 브라켓의 내민 길이, 프리스트레스 하중에 의한 압축응력비를 고려하였다. Table 2는 각 해석모델의 설계 변수 및 최대 강도를 나타낸다.

Table 2 Material properties for PC systems

Model ID	Parameters	Details	Peak strength
PCP	Original	-	995kN
PCP-1	Anchor bolt	$f_y \rightarrow 2f_y$	1,014kN
PCP-2		Elastic material	1,037kN
PCP-3		$d_b \rightarrow 2d_b$	1,176kN
PCP-4		$N \rightarrow 4N$	1,081kN
PCP-5	Bracket	$l_{bracket} = 1/3d$	1,149kN
PCP-6		$l_{bracket} = 1/2d$	1,327kN
PCC	Original	-	1,856kN
PCC-1	Prestressing force	without PS force	2,000kN
PCC-2		$\sigma_p \rightarrow 2\sigma_p$	1,382kN

Note : f_y = yield strength of anchor bolt, d_b = diameter of anchor bolt, N = the number of anchor bolt, $l_{bracket}$ = length of bracket, d = depth of beam, σ_p = average compressive stress applied by prestressing force.

기대강도(P_n)에 도달하지 못한 PCP 모델에 대하여 앵커볼트의 영향을 검토하기 위하여 앵커볼트의 항복강도를 2배 증가(PCP-1), 탄성 앵커볼트(PCP-2), 앵커볼트 직경 2배 증가(PCP-3), 앵커볼트 개수 4배 증가(PCP-4)를 비교하였다. Fig. 12(a)에서 보듯이 앵커볼트의 항복강도가 2배, 또는 탄성 앵커볼트를 사용하는 것은 연쇄붕괴 저항성능 증가에 효과가 거의 없었다(PCP 대비 강도비 1.01 - 1.04). 직경을 2배로 증가시킨 모델에서 연쇄붕괴 저항성능 증가가 가장 크게 나타났으며(PCP 대비 강도비 1.18) 기대강도인 1,121kN보다 큰 최대강도 1175kN가 나타났다. 이처럼 직경의 영향이 큰 이유는 앵커볼트가 단축 인장, 압축에 의해 하중을 전달하기 보다는 다우얼 거동에 의한 휨, 전단에 의해 하중을 전달하기 때문이다. 특히, 앵커 볼트의 개수가 4배인 해석 모델보다 직경 2배의 효과가 큰 것을 미루어 볼 때(PCP-3 vs PCP-4, 휨 강성비 = 1:4, 전단강성비 = 1:1), 앵커볼트의 휨 강성 증가가 연쇄붕괴 저항성능 증가에 더 효과적임을 알 수 있다. 특히, 앵커 볼트의 충분하지 않은 강성 및 강도는 아치 작용에 의한 연쇄붕괴 저항성능을 크게 증가시키지 못하며, 대변형에서 현수작용을 발현시키지 못한다.

앵커볼트 조기항복 및 계면 미끄러짐이 크게 발생한 PCP 모델에 대하여 브라켓의 내민 길이의 영향을 검토하였다. 여기서, 브라켓의 내민길이는 브라켓과 PC보가 직접 맞는 유효 길이로 정의하였다. 브라켓 내민길이가 보 전체 깊이의 1/6배(PCP), 1/3배(PCP-5), 1/2배(PCP-6)를 비교하였다. 브라켓의 내민길이가 길어짐에 따라 앵커볼트를 추가로 설치하였다(PCP: 2개, PCP-5: 4개, PCP-6: 6개). Fig. 12(b)에 나타난 것처럼 내민길이가 증가할수록 연쇄붕괴 저항성능이 증가하였다. 그 이유는 브라켓의 내민 길이가 증가함에 따라 1) 순경간의 감소(식 (4) 참조), 2) 단부에서 상·하부 철근의 정착구간 증가에 따라 휨 거동 발생, 3) 브라켓 앵커 볼트의 개수가 2→4→6으로 증가의 영향 때문으로 판단된다.

기대강도를 발휘한 PCC 모델에 대하여 프리스트레스 하중이 연쇄붕괴 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 프리스트레스 하중 없음(PCC-1) 및 프리스트레스 하중 2배(PCC-2)를 비교하였다. Fig. 12(c)에 나타난 것처럼 프리스트레스 하중이 증가하면 연쇄붕괴 저항성능은 감소하였다. 일반적으로 골조에서 기둥이 붕괴되어 대변형이 발생하면 기하학적 구속 효과에 의해 보에 압축력이 작용한다(즉, 아치 작용). 축력이 없는 골조에서는 이러한 압축력이 휨-압축 상호작용에 의해 보의 휨강도를 증가시키므로 연쇄붕괴 저항성능을 증가시킬 수 있다. 그러나 국내 PC 시스템과 같이 프리스트레스 하중에 의하여 PC보에 압축력이 선재해 되어있는 경우 기하학적 압축력이 추가로 작용하면 콘크리트의 휨-압축 파괴가 조기에 발생하여 휨강도가 감소할 수 있다. 특히 국내 PC 시스템에서는 긴장재가 접합부를 관통하지 않기 때문에 프리스트레스가 압축력만

Fig. 12 Parametric analysis results

증가시키고 단부의 휨강도를 증가시키지 못하여 연쇄붕괴 저항성능을 저해할 수 있다. 또한 보에 작용하는 압축력에 의해 2차효과가 발생하여 휨 모멘트를 추가로 유발하므로 연쇄붕괴 저항성능이 감소된다.

5.3 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴저항 성능 설계 시 고려사항

유한요소해석 결과 국내 PC 시스템의 접합부 종류에 따라 연쇄붕괴 저항성능에 차이가 있었다. 연쇄붕괴 저항성능을 발휘하려면 보의 철근이 접합부를 관통하여 정착되어야 한다. 따라서 연속 접합 방식이 단순지지 접합 방식보다 연쇄붕괴 저항에 유리하며, 이 경우 연쇄붕괴 저항강도는 보 단부의 휨강도를 바탕으로 산정할 수 있다. 그러나 접합방식에 관계없이 현수작용에 의한 강도 증가는 발생하지 않았다.

또한 변수연구에서 나타난 것처럼 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴 저항성능을 증가시킬 수 있는 설계변수는 앵커볼트의 직경 및 브라켓의 내민길이이다. 따라서 연쇄붕괴 저항성능을 증가시키기 위하여 더 큰 직경의 앵커볼트를 사용하거나 브라켓 내민길이의 증가를 고려할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴저항 성능을 검토하기 위하여 대표적인 PC 골조 및 접합방식을 조사하고 이에 대하여 유한요소해석을 수행하였으며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 PC 시스템의 주요 접합방식은 단순지지 접합과 연속 접합으로 구분할 수 있다. 국내 PC 시스템에서는 프리스트레스 하중을 도입한 PC 보를 PC 기둥의 브라켓 위에 올려놓고 앵커볼트로 고정한 후 RC 토핑 콘크리트를 타설하여 마무리한다. 여기서, 단순지지 접합의 경우 보의 상부철근이 RC 토핑 내에 정착되고 접합부를 관통하지 않고, 연속 접합의 경우 상부철근은 접합부를 관통하여 연속 배근하고 하부 철근은 갈고리 상세를 사용하여 접합부 내에 정착한다.

- 2) 비선형 유한요소해석 프로그램(ATENA)를 활용하여 국내 PC 시스템의 연쇄붕괴저항 성능을 평가하였다. 현행 실무 설계 도면을 바탕으로 해석 모델의 형상, 크기, 재료강도, 단면 상세를 정의하였다. 인접한 연속 골조에 의한 횡지지 효과를 고려하여 해석 대상 골조의 경계조건을 정의하였다. 프리스트레스 하중을 하중제어로 먼저 적용하고, 이후 내부 기둥의 파괴 상황을 가정하여 수직 변위를 변위제어로 적용하였다.
- 3) 해석 모델의 검증에 위하여 기존 실험 연구와 비교하였다. RC 골조와 PC 골조에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 하중-변위 관계 및 균열 양상, 파괴 모드를 잘 예측하였다.
- 4) 국내 PC 시스템에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 단순지지 접합 골조 PCP는 앵커 볼트의 항복 이후 하중재하능력이 감소하였다. 보의 콘크리트나 철근의 손상은 크지 않았고 대부분의 균열과 손상이 보-기둥 접합부의 시공 계면에 집중되었다. 연속 접합 골조 PCC는 보의 상·하부 철근이 항복하여 기대강도보다 큰 하중재하능력을 발휘하였다. 또한 보의 상·하부 철근이 파단 변형률에 도달하였으며 휨 균열이 주로 발생하였다.
- 5) 국내 PC 시스템에 영향을 미치는 설계 변수를 조사하기 위하여 변수 연구를 수행하였다. 설계 변수로서 앵커 볼트, 브라켓 내민길이, 프리스트레스 하중을 고려하였다. 앵커볼트의 경우 다우얼 거동에 의해 하중을 전달하기 때문에 휨강성을 증가시키는 것이 연쇄붕괴 저항성능 증가에 유효하였다. 브라켓 내민 길이가 길수록 순경간을 짧게하고 보의 휨거동을 증가하므로 연쇄붕괴 저항성능이 증가하였다. 프리스트레스 하중은 대변형에서 보의 휨강도를 감소시키고 압축력에 의한 2차효과를 증가시켜 연쇄붕괴 저항성능을 저해할 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(연구과제번호: No. 2021R1A4A3030117).

References

- Adam, J.M., Parisi, F., Sagaseta, J., Lu, X. (2018) Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century, *Eng. Struct.*, 173, pp.122~149.
- Baek, J.W., Kang, S.M., Kim, T.H., Kim, J.Y. (2020) Structural Performance of PC Double Beam-Column Connection Under Gravity and Seismic Loading, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1).
- Choi, I.S., Choi, S.D., Kim K.S., Lee, D.H., Ju, H.J. (2015) High-Performance Precast Prestressed Slab System with Structural Esthetic and Material Savings, *Mag. Korea Concr. Inst.*, 27(5), pp.36~39.
- Comittee Euro-International du Beton, (1990) CEB-FIP Model Code 90, Bulletin D'information No. 195,196, Mars.
- Feng, F.F., Hwang, H.J., Yi, W. (2020) Static and Dynamic Loading Tests for Precast Concrete Moment Frames under Progressive Collapse, *Eng. Struct.*, 213, pp.110612
- Global Terrorism Database (2018) National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism (START) [Online], <http://www.start.umd.edu/gtd/> (accessed Sep., 28, 2021).
- Han, B.M., Yoo, G.J. (2020) Build the Precast Concrete Factory with Optimum Precast Concrete Construction Methods, *Mag. Korea Concr. Inst.*, 32(6), pp.61~66.
- Jang, B.S., Kim, J.H., Choi, S.H., Kim, K.S., Hwang, J.H., Choi, S.D. (2021) Structural Behavior of Precast Wide Girder-Column Joints under Lateral Cyclic Loading, *J. Korea Concr. Inst.*, 33(3), pp.289~297.
- Jeon, D.J., Cha, E.H., Han, S.E. (2015) An Effective Modeling Technique for Blast and Progressive Collapse Analysis of Steel Frame, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 31(9), pp.11~18.
- Jung, Y.H., Lee, S.J. (2020) A Study on the Progressive Collapse of Eccentrically Braced Frames, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 36(10), pp.189~198.
- Kang, H.G., Kim, J.K. (2014) Behavior of Column-Foundation Joint under Vehicle Impact, *J. Korea Concr. Inst.*, 26(3), pp.393~400.
- Kang, S.B., Oh, J.H. (2013) Evaluation of Progressive Collapse Resisting Capability of Seismic Designed 5-Story RC Moment-Resisting Frame Using Nonlinear Dynamic Analysis, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 29(7), pp.19~28.
- Kim, H.S., Ahn, H.S. (2014) Erosion Criteria for the Progressive Collapse Analysis of Reinforcement Concrete Structure due to Blast Load, *J. Korea Concr. Inst.*, 26(3), pp.335~342.
- Kim, H.S., Ahn, J.G., Ahn, H.S. (2014) Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Core Structure Subjected to Internal Blast Loading, *J. Korea Concr. Inst.*, 26(6), pp.715~722.
- Kim, H.S., Wee, H.H. (2014) Reduced Degree of Freedom Modeling for Progressive Collapse Analysis of Tall Buildings using Applied Element Method, *J. Korea Concr. Inst.*, 26(5), pp.599~606.
- Kim, J.K., Kim, T.W., Yang, J.H. (2007) Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames Using the Linear Elastic Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 20(4), pp.435~442.
- Na, Y.S., Noh, S.Y., Li, Y. (2021) Sub-assembly Structure Model for Progressive Collapse Resistance Performance Analysis, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 37(9), pp.155~165.
- Vladimir, C., Libor, J., Jan, C. (2018) ATENA Program Documentation Part 1, Cervenka Consulting.
- Yoo, J.C., Kim, D.H. (2006) The Present and Future of Korea in the Precast Concrete, *Complex Arch. Korea Techno. Assoc.*, 1(1), pp.17~27.
- Yoo, K.J., Oh, Y.H. (2020) Application of Precast Concrete Construction Method in Logistics Center, *Rev. Arch. & Build. Sci.*, 64(7), pp.16~20.
- Zhou, Y., Chen, T., Pei, Y., Hwang, H.J., Hu, X., Yi, W. (2019) Static Load Test on Progressive Collapses Resistance of Fully Assembled Precast Concrete Frame Structure, *Eng. Struct.*, 200, 109719.

요 지

최근 현장작업을 최소화할 수 있는 PC(Precast Concrete) 건축공법의 적용이 급속하게 활성화되고 있다. 그러나 PC 공법은 시공 중, 특히 부재간 일체화 이전에 구조적 성능을 발휘하기 어렵고 완공 후에도 접합부의 일체성을 확보하기 어려워 연쇄붕괴에 취약하다. PC 건축물에서는 다양한 PC 부재간 접합 상세가 존재하며, 국내외 구조/시공 상세가 현격히 다르다. 그러나 국내 PC 시스템의 시스템과 상세 특성을 반영한 연쇄붕괴에 대한 연구는 매우 미비하다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 PC 구조시스템과 접합부 구조/시공 상세를 조사 분석하였다. 이를 기반으로 국내에서 사용되는 전형적인 PC 시스템의 유형을 설정하고 상기 PC 시스템의 연쇄붕괴방지성능을 평가하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 국내에서 주로 사용된 PC 구조시스템의 연쇄붕괴방지 성능을 평가하고 구조설계시 고려사항을 제안하였다.

핵심용어 : 국내PC시스템, 연쇄붕괴방지성능, 비선형 유한요소해석, 구조설계, 보-기둥 접합형식