

Bow-Tie형식의 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 콘크리트 연결부 개발 및 해석적 성능 검증

노정휘¹, 배영훈², 이나현^{2*}, 이성진², 김창수³

¹엔케이 이앤씨(주), ²한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부, ³DM엔지니어링

Development and Analytical Performance Verification of Connection using a Horizontal Rotation Connector of Bow-Tie type for Precast Concrete

Jung-Hwi Noh¹, Younghoon Bae², Na-Hyun Yi^{2*}, Sung-Jin Lee², Chang-Su Kim³

¹NK ENC

²Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

³DM Engineering

요약 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, PC) 공법은 공장 제작 후 현장에서 부재를 조립하게 됨으로, 각 부재 사이에 연결부의 안정성 및 구조성능 확보가 반드시 필요하다. 그러나, 현장에서 프리캐스트 부재간 연결을 단순하게 모르타르로 채우거나 간단한 철골을 사용하여 연결하고 있어, 토압 및 반복하중, 지진하중 등의 외부 하중에 의해 프리캐스트 부재간 부등변위가 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 철도 구조물에 사용되는 프리캐스트 부재의 경우에는 철도 운행 시 발생하는 진동에 대해 구조물의 변위 없이 구조성능이 유지하기 위해서는 부재간 수평연결이 더욱 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 Bow-Tie형식의 수평회전연결재를 개발하여, 프리캐스트 콘크리트를 수직방향 뿐만 아니라, 수평방향으로 연속화할 수 있는 연결부를 개발하였다. 또한, RC, Bow-Tie로 연결된 PC, Rotating Bow-Tie로 연결된 PC에 대한 곡선 및 직선부재에 대하여 각각 해석적으로 성능 검증을 수행하였다. 개발된 Bow-Tie형식의 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 공법을 적용하여, 대심도 터널 수직구와 같이 배면토압에 의한 연결부 응력 집중에 의해 발생하는 문제해결과 철도 진동에 대한 세그먼트 연결부의 단면의 경제적 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Abstract In the case of a precast concrete (PC) method, segments are assembled on site after factory production, and it is essential to secure the stability and structural performance of the segment connection. However, in the field, a PC connection is simply filled with mortar or made using a steel frame. Therefore, unequal displacement frequently occurs on a PC segment connection under external loads such as earth pressure and fatigue loads. In the case of a PC segment used in a railroad structure, horizontal connection of a segment is most important in order to keep the structure stable under railway vibration. Therefore, in this study, a bowtie-type horizontal rotation connector was developed. The connector is connected not only in the vertical direction, but also the horizontal direction for sequential construction of PC concrete. The connector's performance was analytically verified using RC, PC with bowtie connection, and PC with rotating bowtie connection on curved and straight members. The developed connector could solve the problems caused by stress concentration on a segment connection due to earth pressure in a vertical shaft. Also, it could be possible to economically segment connection/connector design for railway vibration.

Keywords : Precast Concrete, Horizontal Rotation Connector, Bow-Tie, Segment Connection, Vertical Shaft

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(철도분야 중소기업 지원 및 육성사업, 수평회전연결재를 이용한 철도구조물 급속 PC공법 개발, PK2204B1C)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Na-Hyun Yi (Korea Railroad Research Institute)

email: nahyunyi@krii.re.kr

Received November 15, 2022

Revised January 25, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

대심도 터널 수직구 및 옹벽과 같은 토류구조물 등의 품질확보, 현장에서의 작업 효율화 및 공기 단축을 위해 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, PC) 공법 적용이 증가하고 있다[1-3]. PC 공법의 특성상 단위 부재(Segment)를 현장에서 조립할 때 접합부 발생은 불가피하므로, 세그먼트간 수직 또는 수평방향 접합부의 일체화를 통한 구조체의 연속성 확보가 매우 중요하다[1,3-6]. 2019년 국토교통부는 우리나라도 더 이상 지진에 안전하지 않다는 인식에 따라 지하구조물의 내진설계 신설을 골자로 하는 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)을 제정 고시하였으며[7], 지하에 건설되는 PC 구조체의 내진성능을 RC 구조와 동등한 수준으로 확보하기 위하여 PC 공법 적용 시 접합부의 연결 방식에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다[8-10].

일반적으로 PC 공법 적용 시 단위 부재간 연결 방식은 건식접합과 습식접합으로 분류된다[6]. 건식접합은 콘크리트 또는 모르타르를 사용하지 않고 기계적 장치(커플러, 연결볼트, 포스트텐션 강연선 등)만을 사용하는 방식이며, 습식접합은 현장에서 기계적 장치 사용 후 콘크리트 또는 모르타르를 주입하여 연결부의 일체화를 완성하는 방식이다. 접합부의 시공오차를 흡수할 수 있고 부재간 불연속성을 저감할 수 있는 습식접합 방식의 개발 또는 개선에 대한 연구가 다수 진행되어 왔으며, 벽체 패널간 볼트-너트 건식접합 및 PHC 파일간 볼트-플레이트-너트-핀 건식접합 등의 연구도 수행되었다[1-6,8,11].

본 연구에서는 PC 공법으로 시공되는 터널 수직구 및 옹벽의 연결부 성능을 강화하기 위하여 습식접합 개념으로 개발된 Bow-Tie형식의 수평회전연결재를 적용한 PC 구조체의 성능을 해석적으로 평가하고 RC 구조체의 연결부와 그 성능을 비교하고자 한다.

2. Bow-Tie형식의 수평회전연결재 개념

기존에는 주로 Fig. 1과 같이, 상단에 설치되는 세그먼트의 하부에 사전 삽입된 Splice Sleeve와 하단에 설치되는 세그먼트의 상부 철근을 연결하여 무수축 모르타르로 충전하는 방식으로 PC 세그먼트를 수직연결하고 있으며, 수평으로는 Fig. 2와 같이 접합면을 모르타르로 충전하거나 간단한 철재로 연결하여 사용하고 있는 상황이다.

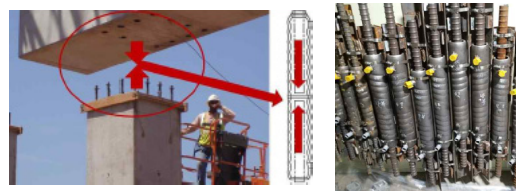


Fig. 1. Vertical connection using splice sleeve of precast concrete segment

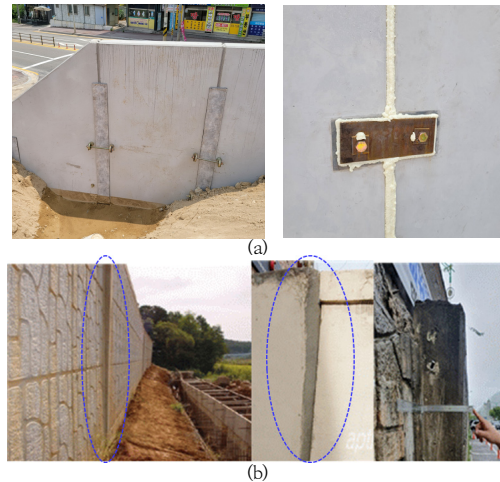


Fig. 2. Existing horizontal connection method and problem of precast concrete segment (a) Existing horizontal connection method (b) Appearance of unequal displacement

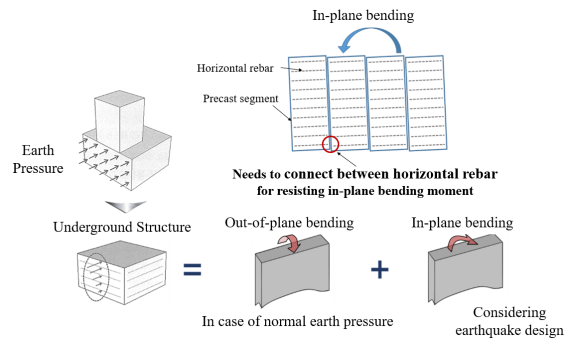


Fig. 3. Schematic diagram of structure behavior according to the KDS(Korea Design Standards)

그러나, 기존 설계기준 KBC(Korean Building Code) 2016에 근거하여 설계된 PC 세그먼트의 수평접합부의 경우에는 단순전단마찰과 토압에 의한 면외휨모멘트에 대해서만 고려하였으나, 최근에는 KDS(Korea Design Standards) 설계기준이 일원화되어 지하구조물에 대한

내진설계 규정이 강화되었으며, 지하 및 토공 구조물의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 면내힘모멘트를 받드시 고려해야 하는 상황이다(Fig. 3).

그러므로, 본 논문에서는 면내힘모멘트를 저항하기 위한 PC 세그먼트의 수평철근을 연결하기 위하여, Bow-Tie 형식의 수평회전연결재를 이용한 PC 세그먼트 연결 시스템을 개발하였다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 수평회전연결재는 나비넥타이 형태의 Bow-Tie 방식과 Rotating Bow-Tie 방식으로 개발하였다. Rotating Bow-Tie 연결재는 Bow-Tie를 회전시키기 어려운 300mm이하의 얇은 벽체에서도 시공하기 위하여, 수평회전연결재를 삽입시에는 Fig. 4(b)와 같이 접힌 상태로 삽입하여, 루프이음철근에 맞닿으면 고정되는 형식으로 개발하였다. 나비넥타이 형태의 Bow-Tie 방식은 Fig. 5와 같이 루프이음철근이 매립된 프리캐스트 세그먼트를 결합하기 위하여, Bow-Tie형식의 수평회전연결재를 삽입 후 옆으로 회전시켜 고정하도록 개발하였다. 그 이후 연결부 수직철근을 삽입한 후 무수축 모르타르를 타설하는 순으로 시공이 가능하도록 개발하였다.

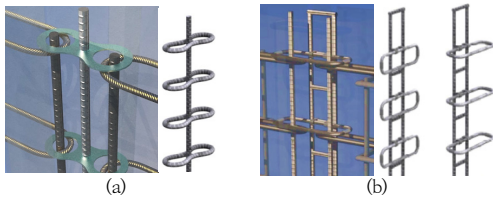


Fig. 4. Concept of Bow-Tie precast horizontal connection (a) Bow-Tie connection (b) Rotating Bow-Tie connection

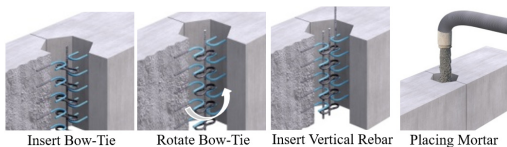


Fig. 5. Construction method of developed Bow-Tie horizontal connection

3. 유한요소해석 모델링

3.1 유한요소해석 개요 및 연결부 상세

본 논문에서는 Bow-Tie를 적용한 프리캐스트 세그먼트 연결부 상세 성능을 검증하기 위하여, 범용 비선형 해석프로그램인 Midas FEA를 적용하여 철근과 콘크리트

의 비선형성을 고려하여 해석을 수행하였다. 프리캐스트 세그먼트 부재의 연결부 상세와 수평회전연결재의 형상 및 제원은 Fig. 6과 같으며, 본 논문에서는 각 부재에서 발생하는 응력전달을 위해 일반 철근콘크리트 부재와 개발된 Bow-Tie, Rotating Bow-Tie 형식의 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 콘크리트 부재를 해석적으로 비교 분석하였다. 여기서, 수평회전연결재의 두께는 12mm이며, 강재 SM355을 사용하였으며 이는 인장강도는 490MPa, 항복강도는 355MPa이다.

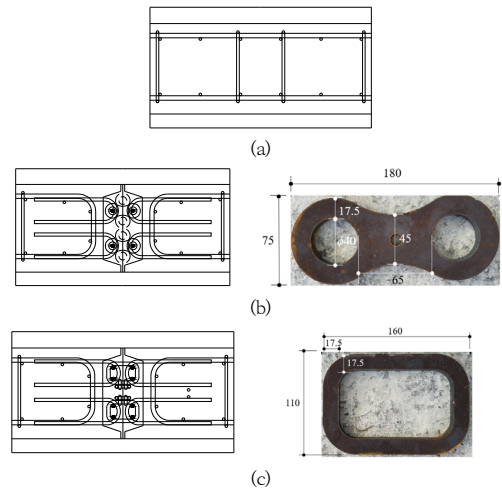


Fig. 6. Connection detail and specification (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC (unit: mm)

3.2 유한요소해석 모델링 및 경계조건

수평회전연결재 해석은 지하구조물 중에 대표적인 수직구의 실물 크기에서 향후 검증하고자 하는 실험실 제원을 고려하여, Fig. 7과 Fig. 8과 같은 크기의 곡률과 직선형태의 RC부재 및 개발된 PC 연결부재(Bow-tie, Rotating Bow-Tie)의 면내힘모멘트 저항성을 검토하였다.

곡률과 직선형태의 수치해석 모델링은 Fig. 9와 Fig. 10과 같으며, 콘크리트는 솔리드 요소로, 철근은 내재요소(Embedded Element)로 모델링하였다. 접합면의 경우에는 콘크리트와 모르타르는 완전부착으로 가정하여 모델링하였다. 콘크리트는 압축강도 27MPa, 연결부는 40MPa의 무수축 모르타르를 적용하였다. 또한 Bow-Tie와 Rotating Bow-Tie의 인장력에 대해 루프이음철근(H16)의 단면으로 환산하여 모델링하였으며, 각 연결재와 루프이음철근이 완전부착하는 것으로 가정하여 모델링을 수행하였다.

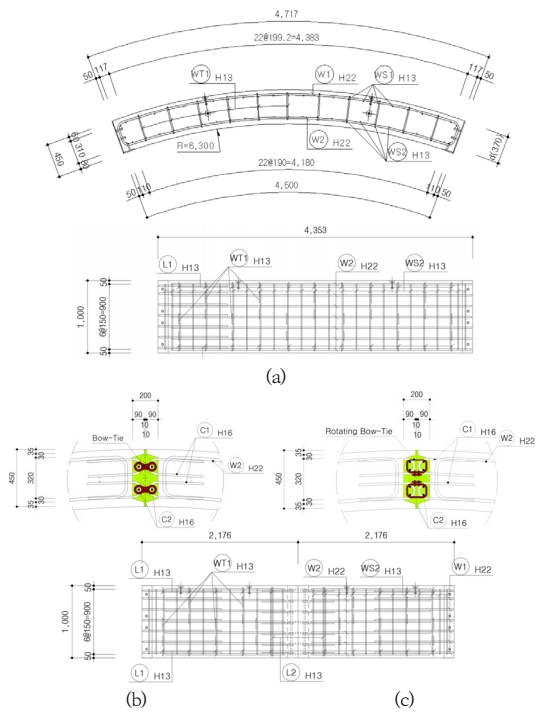


Fig. 7. Specification of curvature member (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC (unit: mm)

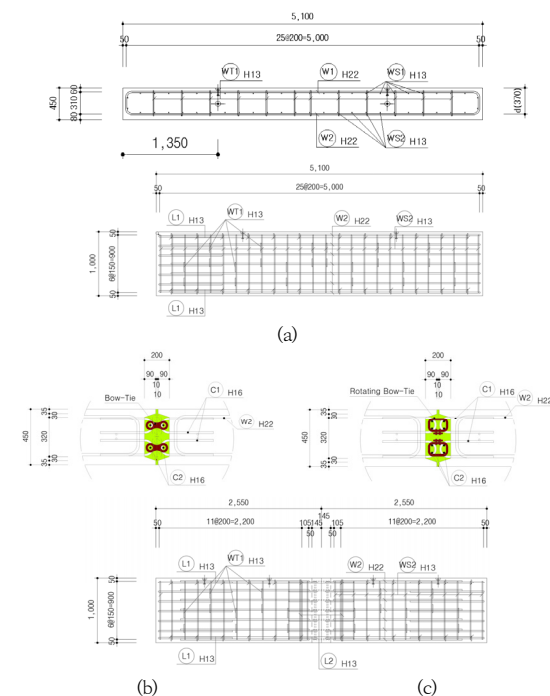


Fig. 8. Specification of straight member (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC (unit: mm)

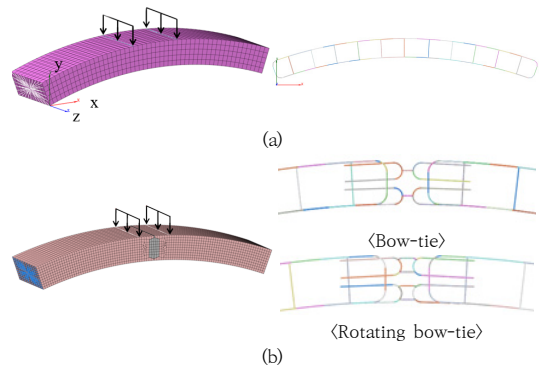


Fig. 9. Concrete and rebar modeling of curvature member (a) RC (b) Bow-Tie and Rotating Bow-Tie PC

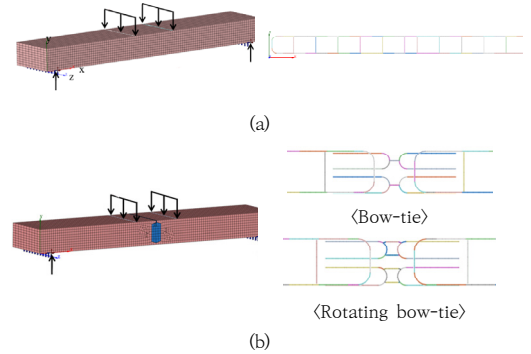


Fig. 10. Concrete and rebar modeling of straight member (a) RC (b) Bow-Tie and Rotating Bow-Tie PC

해석 모델링의 경계조건은 향후 실험조건을 모사하기 위하여, 곡률형태는 부재 양쪽 단부를 강결하여, 변위에 대해서는 모두 구속하였으며, 면내휨모멘트를 주기 위하여 z축 방향으로만 회전 가능한 조건으로 설정하였다. 직선형태의 경우에는 양쪽 단부의 250mm에 힌지와 롤러를 모사하여, 롤리지점에는 x축 방향에 자유도를 주었으며, z축방향으로는 회전 가능하도록 구속하였다. 또한 하중은 파괴시점까지 재하할 수 있도록 변위제어로 설정하였다.

3.3 재료모델

3.3.1 콘크리트 모델링

콘크리트 및 모르타르의 비선형 거동을 검토하기 위하여 Total Strain Crack Model 재료모델을 사용하여 비선형성 구성방정식을 통한 응력 및 균열상태를 연속적인

형태로 표현하였다. Total Strain Crack Model에서는 압축축과 인장축을 구분하여 재료모델을 구성할 수 있으며, 본 논문에서는 Eq. (1)과 같이 압축축에는 도로교설계기준 한계상태설계법(2015)의 5.5.1.6(1)에서 제시하는 비선형 해석을 위한 응력-변형률 관계 식을 적용하여 콘크리트의 최대 압축강도 이후의 영향을 고려하였으며, 인장축에는 콘크리트 인장응력 이후에는 콘크리트 응력을 무시하는 brittle 함수를 사용하였다.

$$f_c = f_{cm} \left(\frac{k(\epsilon_c/\epsilon_{co,r}) - (\epsilon_c/\epsilon_{co,r})^2}{1 + (k-2)(\epsilon_c/\epsilon_{co,r})} \right) \quad (1)$$

여기서, $k = 1.1E_c\epsilon_{co,r}/f_{cm}$

$\epsilon_{co,r}$: Strain on maximum stress

$\epsilon_{co,r}$: Ultimate limit strain

균열모델은 이산균열모델(Discrete Crack Model)이 아니라 분산균열모델(Smeared Crack Model)을 사용하였다. 또한 균열방향은 고정균열모델과 회전균열모델 중에서 사인장파괴를 표현하고 단조증가하중에 대해 실제 거동과 유사하게 나타나는 회전균열모델을 사용하였다[12,13].

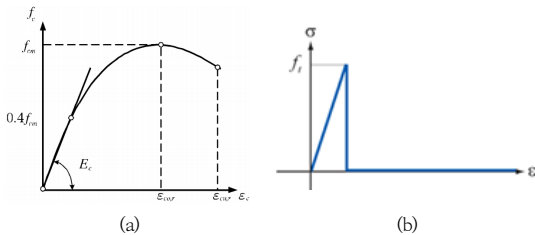


Fig. 11. Applied concrete material model (a) Compression model (b) Tension model

3.3.2 철근 모델링

철근 및 수평회전연결재의 모델은 별도의 절점을 가진 요소가 아닌 철근을 포함한 콘크리트 모델요소에 철근의 요소강성을 더하는 내재요소(Embedded Element) 형태로 구성하였다. 이는 동일 변위장을 기반으로 유도되지만, 콘크리트 내 철근의 배근 위치에 대한 정보를 강성 계산 시 반영하여 철근의 방향성을 고려할 수 있고, 콘크리트의 요소에 상관없이 철근을 배치할 수 있는 장점이 있다. 철근의 비선형 응력-변형률은 von-Mises 항복조건을 사용하였으며, 항복강도는 400MPa, 인장강도는 460MPa, 극한변형률은 0.05를 적용하였다.

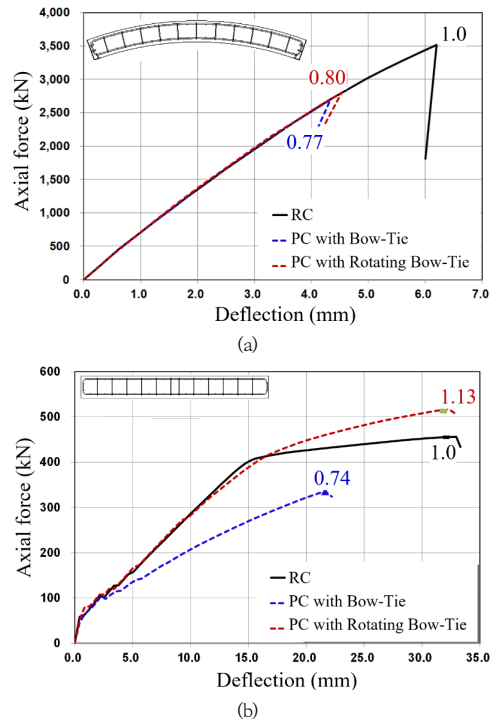


Fig. 12. Analytical comparison of axial force-deflection with RC and PC with developed Bow-Tie connection (a) Curvature type (b) Straight type

4. 유한요소해석 결과

4.1 하중-변위 곡선

곡률 및 직선부재 지점에서의 최대 반력과 하중 정중앙에서의 최대 변위와의 관계는 Fig. 12와 같다. 곡률부재의 경우에는 Fig. 13에서 보는 것과 같이 압축연단에서 콘크리트 파괴 거동이 발생하였으며, 직선부재에 비하여 5.2-10.5배의 하중을 견디다가 취성적으로 파괴되는 것을 확인할 수 있다. 이는 곡률부재의 특성상 부재 상면에서 수직력이 작용할 때, 수직력이 부재를 타고 경계조건까지 이동하는 Arching Action에 의함이라고 판단된다. Table 1과 Fig. 12에서 확인할 수 있는 것과 같이 RC부재는 3,515kN의 하중에서 파괴되었으나, Bow-Tie PC부재는 2,693kN, Rotating Bow-Tie PC부재는 2,803kN의 하중에서 파괴되었다. 곡률형태의 Bow-Tie와 Rotating Bow-Tie PC부재는 RC부재에 비하여 0.77배, 0.80배의 최대하중의 차이가 나타나는

것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 17에서 보는 P-M상관도에서 보는 것과 같이, 곡률부재는 축력과 휨모멘트를 동시에 받기 때문에 부재단면의 저항모멘트가 RC부재> Rotating Bow-Tie PC부재> Bow-Tie PC부재 순으로 발생한 것과 같이 Fig. 12(a)의 최대하중이 발생하였다.

Table 1. Analytical value of axial force-deflection

Max.	Curvature type		Straight type	
	Force(kN)	Defl.(mm)	Force(kN)	Defl.(mm)
RC	3.515	6.20	456	32.96
Bow-Tie PC	2.693	4.34	336	21.63
Rotating Bow-Tie PC	2.803	4.53	518	32.29

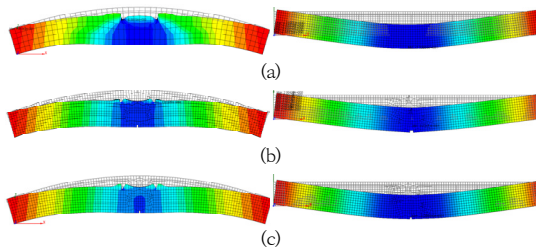


Fig. 13. Figuration of (left) curvature and (right) straight members (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC

반면 직선부재의 경우에는 곡률부재에 비해 연성적으로 거동하며 Fig. 13에서 보는 것과 같이 휨파괴가 발생하였다. RC부재는 465kN의 하중에서 파괴되었으나, Bow-Tie PC부재는 336kN, Rotating Bow-Tie PC부재는 518kN의 하중에서 파괴되었다. 즉, RC부재에 비하여 Bow-Tie와 Rotating Bow-Tie는 0.74배, 1.13배의 최대하중이 나타나 Rotating Bow-Tie가 RC부재에 비해 더 높은 휨 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 Rotating Bow-Tie의 경우에는 루프이음철근과 Rotating Bow-Tie를 연결할 시에 4개의 수직철근을 삽입하게 되면서, Bow-Tie에는 2개의 수직철근에 비해 2배 많이 배치되었기 때문이라고 판단된다.

4.2 콘크리트의 소성변형

곡률부재와 직선부재의 콘크리트의 소성변형은 Fig. 14와 Table 2와 같이 나타낼 수 있으며, 곡률 RC 부재의 하부에서는 압축 소성변형이 인장 소성변형에 비해 크게 발생하였으며, Bow-Tie 연결재로 연결된 구조재는

압축면과 인장측에 유사하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 직선부재에서는 주로 휨파괴에 의한 균열 양상이 나타났으며, RC부재는 0.00378, Bow-Tie로 연결된 프리캐스트 부재는 0.00620으로 콘크리트의 변형률 0.003 이상의 변형이 발생하였다. Rotating Bow-Tie로 연결된 프리캐스트 부재는 0.00213으로 콘크리트 최대 변형률에는 도달하지 않은 것을 확인하였다.

Table 2. Maximum concrete effective plastic strain

	Curvature type		Straight type
	Tension	Comp.	
RC	0.000105	0.00207	0.00378
Bow-Tie PC	0.000214	0.00168	0.00620
Rotating Bow-Tie PC	0.000176	0.00171	0.00213

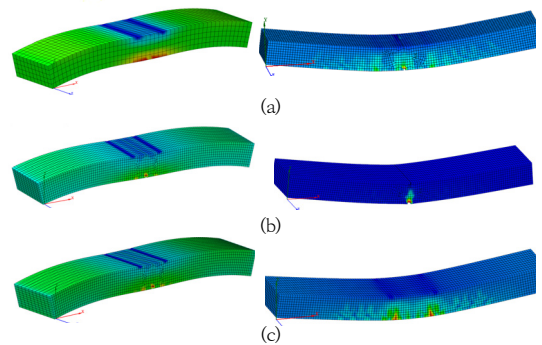


Fig. 14. Concrete plastic strain of (left) curvature and (right) straight types (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC

4.3 철근의 거동검토

Fig. 15와 Fig. 16은 배근된 철근의 von-Mises stress와 strain의 분포를 도식화 하였다. von-Mises stress의 최대값이 항복응력에 도달하게 되면 파괴가 진행되는 것으로 판단할 수 있으며, Table 3은 von-Mises stress의 최대값을 나타내었다. 철근의 항복응력은 400MPa임으로 곡률부재의 모든 해석케이스에 대해서는 항복하지 않았으나, 인장응력에 비해 압축응력이 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

직선부재의 경우에는 Bow-Tie로 연결된 PC부재에서 가장 큰 462.3MPa 응력을 받아 항복하는 것을 확인할 수 있다. 즉 이는 앞선 결과에서 확인한 것과 같이 Bow-Tie로 연결된 PC부재에서 가해지는 하중에 대하

여 충분히 견디지 못하는 것을 확인할 수 있으며, Rotation Bow-Tie로 연결된 PC부재에서는 인장철근이 최대 419.8MPa으로 항복하였으나 수직철근의 추가적인 배근으로 인해 RC부재 대비 13%의 하중을 추가적으로 받을 수 있었음을 확인하였다.

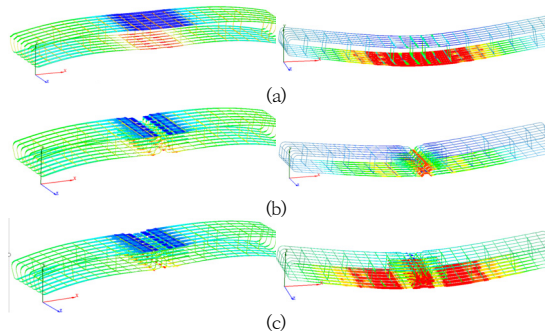


Fig. 15. Rebars von-Mises stress of (left) curvature and (right) straight types (a) RC (b) Bow-Tie PC (c) Rotating Bow-Tie PC

Table 3. Maximum von-Mises stress of rebar

(unit : MPa)	Curvature type		Straight type
	Tension	Comp.	
RC	84.7	223.4	400
Bow-Tie PC	111.8	199.2	462.3
Rotating Bow-Tie PC	157.5	210.4	419.8

Fig. 16의 철근에서 받는 변형을 분포는 응력분포와 유사하나, 곡률부재의 RC부재에서는 압축연단에서 항복하였으며, 수평회전연결재로 연결된 곡률 PC부재의 철근은 압축연단에서 항복변형률까지 도달하지는 않았으나 크게 발생한 것을 확인하였다. 또한 직선부재의 인장철

근에서도 모두 휨파괴 거동으로 항복변형률이 발생하는 것으로 볼 수 있으며, Bow-Tie 및 Rotating Bow-Tie 수평회전연결재에 배치된 U형 루프이음철근에서 항복한 것을 볼 수 있다.

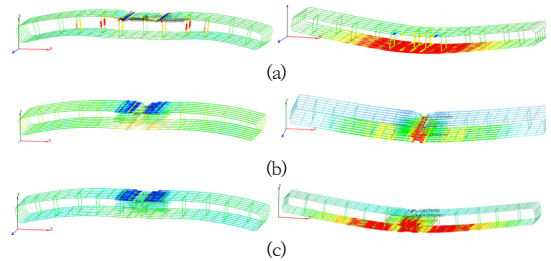


Fig. 16. Rebars strain of (left) curvature and (right) straight types (a) RC (b) PC with Bow-Tie (c) PC with Rotating Bow-Tie

4.4 P-M 상관도

개발된 수평회전연결재를 이용한 연결부에 대한 곡률부재 단면은 축력과 휨모멘트가 동시에 발생하였으며, 실제 수직구와 같은 구조물에서는 곡률부재와 같이 축력과 휨모멘트를 동시에 받을 수 있다. 축력과 휨모멘트가 독립적으로 작용할 때와 다른 항복강도를 갖게 되며, 특히 2방향 지진하중이 발생할 경우 부재 내부의 2축 휨모멘트와 축력 사이에 복잡한 상관작용이 발생하게 되면 구조물의 동적응답에 영향을 미치게 됨으로 본 논문에서는 곡률부재 단면의 P-M 상관도를 통해 개발된 연결부재 단면의 저항성능을 Fig. 17과 같이 검토하였다[14].

Fig. 17에서 보는 것과 같이, 수평회전연결재로 연결된 프리캐스트 세그먼트 단면의 저항 모멘트(ϕM_n)는 RC부재 비하여 Bow-Tie로 연결된 PC부재는 89%, Rotating Bow-Tie로 연결된 PC부재는 92%로 다소 감소하였다.

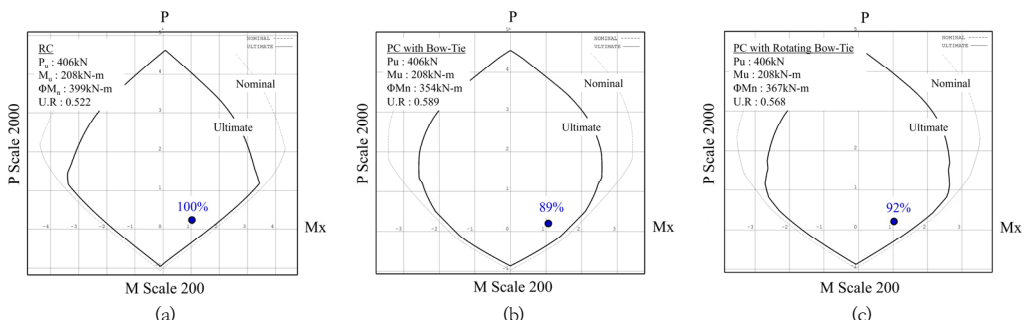


Fig. 17. P-M curve of curvature type (a) RC, (b) PC with Bow-Tie, (c) PC with Rotating Bow-Tie

그러나, 단면의 활용률(Utilization Ratio, $U.R = M_u / \phi M_n$)은 RC부재는 0.522, Bow-Tie로 연결된 PC부재는 0.589, Rotating Bow-Tie로 연결된 PC부재는 0.568로 RC부재에 비하여 1.12, 1.09배 증가한 것을 확인할 수 있다. 즉, 축력과 휨모멘트에 대한 단면의 여유력은 RC부재는 0.478, Bow-Tie로 연결된 PC부재는 0.411, Rotating Bow-Tie로 연결된 PC부재는 0.431를 확보하고 있으므로, 개발된 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 세그먼트의 연결부는 충분한 구조적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 지하 및 토공구조물의 내진설계 규정이 강화됨에 따라 기존 프리캐스트 세그먼트의 수직방향 연결방식에서 수평방향 프리캐스트 세그먼트의 효율적인 시공과 연결성능을 확보하고자 Bow-Tie를 적용한 수평회전연결재를 개발하였으며, Midas FEA 비선형 해석을 통한 프리캐스트 세그먼트 수평회전연결부의 구조성능을 해석적으로 검토하였다. 곡률과 직선형태에 대하여 RC, Bow-Tie로 연결된 PC, Rotating Bow-Tie로 연결된 PC를 변수로 설정하여 검토한 결과, 곡률형태의 모든 부재에서는 콘크리트 압축파괴에 의한 취성적 거동을 나타내고 있으며, Bow-Tie와 Rotating Bow-Tie PC부재는 RC부재의 최대하중에 비해 0.77배, 0.80배로 최대 23% 작게 발생하였다. 직선형태에서는 Bow-Tie와 Rotating Bow-Tie PC부재는 RC부재의 최대하중에 비해 0.74배, 1.13배의 휨 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 모두 인장철근에서 항복변형률이 발생하며 휨파괴 거동을 나타내며, 수평회전연결재에 배치된 U형 루프이음철근에서 항복하는 것을 확인하였다. 또한 곡률형태의 부재의 P-M상관도 분석을 통하여 Bow-Tie 형식의 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 세그먼트 연결부의 단면 여유력이 Bow-Tie PC부재는 0.411, Rotating Bow-Tie PC부재는 0.431으로 RC부재가 0.478 확보한 것과 비교하여 0.047-0.067의 유사한 단면 여유력을 가지는 것을 통해, 충분한 구조적 안정성을 확보하였다고 판단된다.

향후 본 논문의 구조해석 결과의 검증은 위하여 동일한 크기의 시편을 곡률과 직선형태로 각각 제작하여 Bow-Tie를 이용한 수평회전연결재의 구조실험을 통한

연결부 구조성능을 검증하고, 구조해석 결과와 비교하여 구조물의 안정성을 검토하고자 한다. 개발된 수평회전연결재를 이용한 프리캐스트 공법을 대심도 터널 수직구 또는 토류벽 및 옹벽 등에 적용하여 기존 배면토압 및 철도진동에 의해 발생하는 연결부 응력집중 문제해결이 될 것으로 판단되며, 이를 통해 기존의 슬립폼을 사용한 현장타설 시공에 비하여 빠른 시공을 통한 공사기간 단축이 가능할 것으로 보이며, 수평방향으로의 세그먼트 연결을 단순하면서도 빠르면서 안전한 시공이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] D. M. Kang, Y. G. Park, H. G. Lee, D. Y. Moon, "Experimental studies on bond and splice performance of splice sleeve for connecting rebar", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.20, No.2 pp. 257-264, April 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7782/jksr.2017.20.2.257>
- [2] E. Choi, Y. Shin, "Development of wide connection method for vertical joints of precast concrete walls", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.5, pp. 549-556, Oct. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.4334/jkci.2009.21.5.549>
- [3] Winterton, T.R. Developments in precast concrete tunnel linings in the United Kingdom. In: *Tunnelling '94*. Springer, Boston, MA., 1994, pp 601-633.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2646-9_35
- [4] S. Kim, S. Seo, S. H. Kim, B. Lim, J. Cha, "Hysteretic characteristic of precast concrete wall with box type connector for vertical bars under horizontal load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.31, No.2, pp. 153-163, April 2019.
DOI: <https://doi.org/10.4334/jkci.2019.31.2.153>
- [5] S. Seo, S. H. Kim, J. Cha, B. Lim, "Seismic capacity of precast concrete wall corresponding to connection detail of vertical bars at horizontal joint", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.32, No.6, pp. 541-551, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.4334/jkci.2020.32.6.541>
- [6] Y. Oh, J. Moon, J. Kim, J. Lee, S. Shin, "Evaluation of structural performance for precast concrete double-wall with different aspect ratios and joint rebar ratios", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.32, No.5, pp. 445-455, Oct. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.4334/jkci.2020.32.5.445>
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), *Seismic Design Standard for Structures (KDS 41 17 00)*, pp. 1-122, 2018 (in Korean), Available From: <https://www.kcsc.re.kr/StandardCode/Viewer/30146> (accessed Dec. 20, 2022)

- [8] A. R. Barbosa, D. Trejo, D. Nielson, "Effect of high-strength reinforcement steel on shear friction behavior", *Journal of Bridge Engineering*, Vol.22, No.8, pp.04017038, Aug. 2017.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001015)
- [9] S. S. Lee, "Structural performance of horizontal connection using threaded rebar for precast concrete wall panels", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.37, No.7, pp. 175-182, July 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5659/JAIK.2021.37.7.175>
- [10] K. M. Ro, C. G. Cho, Y. Hak. Lee, "An experimental study on flexural performance of precast concrete modular beam systems", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.21, No.3, pp. 69-76, Sept. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.9712/kass.2021.21.3.69>
- [11] J. Ahn, H. Moon, M. Ha, K. Cho, "Connection resistance of mechanical joint using connection plate for improvement of connectivity between PHC piles", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.23, No.7, pp. 25-32, Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.11112/JKSMI.2019.23.7.25>
- [12] S. C. Kim, Y. K. Ahn, S. Y. Park, "A Study on nonlinear behavior of RC structure using different crack model", *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 6, No.4, pp139-146, Oct, 2002, Available From: <https://koreascience.kr/article/JAKO200217061964130.pdf> (accessed Dec. 20, 2022)
- [13] H.G. Kwak, D. Y. Kim, "Nonlinear finite element analysis of RC shear walls under cyclic loadings", *Journal of the computational structural engineering institute of Korea*, Vol.16, No.4, pp.353-368, Dec. 2003, Available From: <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200311922203227&oCn=JAKO200311922203227&dbt=JAKO&journal=NJOU00290988> (accessed Dec. 20, 2022, only access Internet Explorer)
- [14] W.H. Choi and J.M. Kim, "Introduction to Nonlinear Dynamic Analysis of MIDAS Program", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. .18, No.4, pp.52-64, Dec. 2005, Available From: <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200511722608803&oCn=JAKO200511722608803&dbt=JAKO&journal=NJOU00290891> (accessed Dec. 20, 2022, only access Internet Explorer)

노 정 휘(Jung-Hwi Noh)

[정회원]



- 1998년 2월 : 경북대학교 공과대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 ~ 2021년 10월 : GS건설 기술연구소 책임연구원
- 2021년 11월 ~ 현재 : 엔케이 이앤씨(주) 기술연구소장

<관심분야>

프리캐스트콘크리트, 모듈러시공

배 영 훈(Younghoon Bae)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학석사)
- 2020년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 (구조공학 박사수료)
- 2003년 3월 ~ 2007년 3월 : (주)동호(舊금호엔지니어링) 구조부 대리
- 2007년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도궤도, 콘크리트구조 및 재료, 철도유지보수

이 나 현(Na-Hyun Yi)

[정회원]



- 2008년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2013년 8월 ~ 2015년 5월 : 싱가포르 NTU Post-Doc.
- 2015년 8월 ~ 2015년 10월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2015년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도궤도, 콘크리트 구조 및 재료, 철도 인프라

이 성 진(Sung-Jin Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : KAIST 토목공학과 (지반공학 석사)
- 2004년 2월 : KAIST 건설및환경 공학과 (지반공학 박사)
- 2004년 3월 ~ 2006년 12월 : GS 건설 기술본부 선임연구원

- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 첨단궤도토목 본부 책임연구원

<관심분야>

철도터널, 궤도노반, GPR

김 창 수(Chang-Su Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 5월 ~ 1999년 12월 : 다산건설턴트 주임
- 2000년 1월 ~ 현재 : DM엔지니어링 전문

<관심분야>

토목구조