

채널과 커플러를 사용한 모듈식 구조체 우각부 연결구조의 성능검증 실험

이준경¹, 이종순^{1*}, 이성형¹, 김희성¹
¹현대건설 연구개발본부

Performance Test of Corner Rigid Joint for Modular Structure using Channel and Coupler

Jun-Kyoung Lee¹, Jong-Soon Lee^{1*}, Sung-Hyung Lee¹, Hee-Sung Kim¹

¹Division of Research & Development, Hyundai Engineering & Construction, Korea

요약 최근 저심도의 도시철도 시스템이 제안되어 지상고가 형식의 민원과 지하경전철 형식의 비경제성을 극복하기 위한 연구가 진행 중이다. 본 연구에서는 저심도 지하구조물의 경제성과 시공성 확보를 위하여 가시시설을 대체하는 프리캐스트 형식의 모듈식 구조체를 적용하기 위하여 영구 강성벽체와 상부 슬래브간 연결부 조인트에 대한 구조적 성능을 검증하고자 실내 재하실험을 수행하였다. 성능재하 실험결과, 가시시설 대체 강성벽체와 상부 슬래브간 연결부 구조는 휨모멘트 전달구조임을 확인하였다. 특히 휨 지배를 받는 상부에서는 채널형태보다는 커플러 조합이 휨 저항 성능이 30%정도 증가하여 유리함을 확인하였으나, 성능 개선이 필요한 것으로 확인되었다.

Abstract Recent study about near-surface is proposed to overcome non-economic of underground railway and to reduce people's complaints of ground elevated railway. In this report, precast modular structure system replacing temporary facilities is applied to ensure the construction ability and economic feasibility. To verify the performance of connection joint between permanent structural wall and upper slab, loading test is carried out. As a result of the test, wall replacing temporary structure to slab connection is possible to transfer bending moment. By 30% increase of bending resistant performance for connection joint using coupler, coupler connection joint is more advantageous to resist bending moment compared to channel connection.

Key Words : Connection rigid joint, Near-surface transit, Precast modular structure, Static load test

1. 서론

도시지 내 도시철도는 주로 지하 20~30m 심도의 기존 지하철이나 지상고가의 형식의 경전철로 계획된다. 하지만 기존 지하철은 고가의 공사비와 긴 환승 시스템 등의 문제가 있고, 지상고가 형식의 경전철은 육중한 고가구조물로 인해 도시미관을 저해하고 소음/진동 등의 영향으로 다수의 민원이 발생한다. 이러한 문제점을 해

결하고자 저비용 저심도 도시철도 적용에 대한 연구가 진행되고 있다[1].

저비용 저심도 시스템은 공용도로를 따르는 선형성과 지하 5~7m에 건설되기 때문에 공사비 절감과 소음/진동이 적고 사용자의 효율적인 접근성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 저심도 지하구조물의 경제성과 시공성 확보를 위하여 가시시설을 대체하는 프리캐스트 형식의 모듈식 구조체를 적용하였다[1-3].

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 "저비용 저심도 인프라 핵심기술 개발" 연구비지원(14RTRP-B068762-02)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jong-Soon Lee(Hyundai Engineering & Construction)

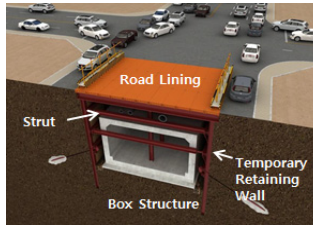
Tel: +82-31-280-7207 email: jslee726@hdec.co.kr

Received January 26, 2015

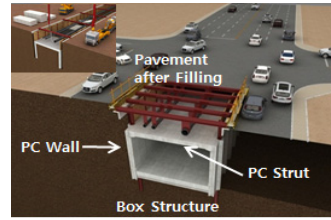
Revised March 4, 2015

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015



(a) Conventional - Temporary Wall Structure



(b) This Study - Permanent Wall Structure

[Fig. 1] Construction Concept of Near-surface Transit

모듈식 구조체 연결부는 크게 강성벽체와 강성벽체간의 연결과 벽체와 상부슬래브 간의 연결부로 구성된다 [4]. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시공 중에 가시설 역할을 대체하는 강성벽체와 상부 슬래브를 연결하는 우각부의 연결구조에 대하여 구조적 성능 검증실험을 수행하였다.

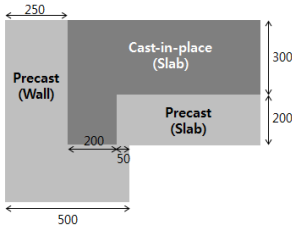
2. 모듈식 구조체 연결부 실험계획

2.1 모듈식 구조체 연결부

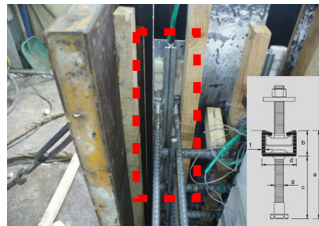
지하구조물을 형성하는 모듈식 구조체 연결부는 크게 벽체와 벽체간의 연결(Wall to Wall), 강성벽체와 슬래브를 연결(Wall to Slab)하는 라멘 형태의 연결부가 있다. 본 연구에서는 라멘형태를 구성하는 벽체와 슬래브 간의

연결을 위해 Fig. 2 (a)와 같이 강성벽체와 슬래브 하부는 프리캐스트로 제작하고 슬래브 상부는 현장타설 콘크리트로 연결하는 구조를 대상으로 한다. 현장 시공 순서를 고려하여 연결을 용이하게 하고, 프리캐스트 벽체와 상부 슬래브간 시공오차 보정을 위하여 Fig. 2 (b), (c)와 같이 C형 채널에 T볼트를 결합하는 형태를 이용한 연결부를 적용하였다.

벽체와 슬래브간의 연결부 형태에 따른 구조물의 거동을 확인하고자 Table 1과 같이 커플러와 T볼트 연결부 형태를 구성하여 실험을 진행하였고, 물성은 Table 2와 같다. 실험 조건은 프리캐스트 패널과 현장타설부 연결을 위하여 상부 슬래브 상단/하단에 C형 채널과 커플러를 적용하는 조건을 고려하였다.



(a) Schematic of Half Precast



(b) T-bolt (Manufacturing)



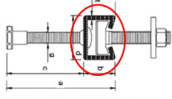
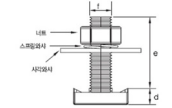
(c) T-bolt (Specimen)

[Fig. 2] Joint of precast wall and half precast slab

[Table 1] Types of Wall to Slab Connection/Joint

Type	Condition		Width (m)	Length (m)	Thickness (mm)	Connection Detail Types (Upper+Lower)
	Wall	Slab				
WS #1	Post-tension	- Upper : Coupler - Lower : C channel + T bolt	2.5	3.9	500	Coupler + T bolt
WS #2	Post-tension	- Upper : C channel + T bolt - Lower : C channel + T bolt	2.5	3.9	500	T bolt + T bolt
WS #3	-	- Upper : Coupler - Lower : C channel + T bolt	2.5	3.9	500	Coupler + T bolt

[Table 2] Material property of Wall to Slab

	Material	Property	Remark
Concrete	Compressive strength (MPa)	40	PS, RC
Steel / Coupler	Yield strength (MPa)	400	D25, D16
C channel		30(b)× 54(d)× 5(t) mm	WJC 5430L
T bolt		13(d)× 65(e) mm	WJC 5430

하단부는 C형 채널을 적용하고 상단부는 커플러를 이용하는 WS#1, WS#3 경우와 상단부에도 C형 채널을 적용하는 WS#2 경우를 고려하였으며, 벽체의 강선 긴장 여부에 대한 영향을 검토하고자 WS#1, WS#3을 구분하였다. C형 채널은 주철근 직경과 상용 T볼트 직경을 고려하여 Fig. 2 (b)와 같이 2열로 배치하였다.

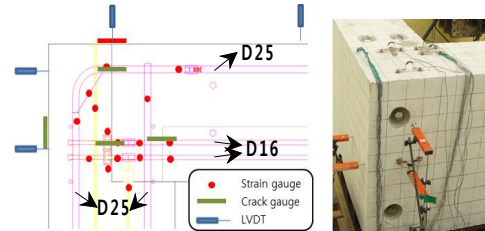
2.2 실험방법

실험은 슬래브 상단에 재하되는 하중과 실험체의 고정하중을 반영하여 수직으로 실험체를 세워놓고 구조물 거동을 확인하여야 하나 실험체 하중 재하특성 및 실험시 안전성을 고려하여 Fig. 3 (a), (b)와 같이 실험체를 눕혀놓은 상태로 수평방향으로 슬래브 끝단에 ±2,000kN의 유압 정적 액츄에이터로 가력하여 벽체-슬래브 연결부인 우각부에 휨모멘트가 발생하도록 정적하중 재하실험을 진행하였다. 하중은 Fig. 3 (c)와 같이 변위제어에 의한 반복가력실험을 실시하였다[5-7].

연결부에 대한 전반적인 실험 거동 확인을 위하여 유압 정적가력기에 설치되어 있는 로드셀과 변위계를 통해

하중-변위 관계를 측정하였으며, 벽체-슬래브 연결부의 재하단계별 부분적인 거동 특성을 파악하기 위해 변형률계, 균열계, 변위계를 Fig. 4와 같이 부착하였다.

특히 균열계는 벽체와 슬래브 연결부 및 프리캐스트와 현장타설 연결부에 설치하여 균열 시점을 확인하였다.



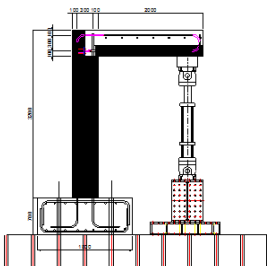
[Fig. 4] Sensor location

3. 연결부의 실험결과 및 분석

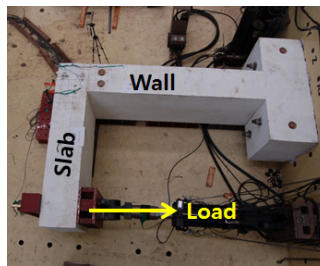
3.1 하중-변위 결과

벽체-슬래브 연결부의 성능을 확인하고자 수평변위는 선형으로 증가시키다가 일정 범위 이상에서는 비선형으로 증가시켜 변위제어를 실시하고, 그 때 가력기에 설치된 변위계에서 측정되는 결과는 Fig. 5 (a)와 같이 정확하게 재하되고 있다.

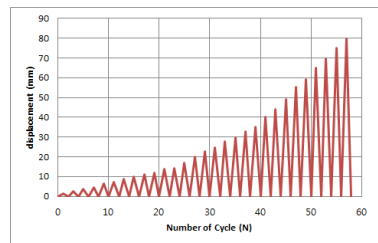
실험체의 선형 및 비선형 거동을 확인하고자 하중과 변위의 증가분에 대한 비를 Fig. 5 (b), (c), (d)에 도식화하였다. 이를 살펴보면, 부재 저항에 의한 최초 균열 발생 시점까지는 선형거동을 나타내다가 그 이후로는 변위곡선과는 달리 거의 일정한 하중 크기로 비선형거동을 나타내고 있는데, 이는 변위제어 특성에 의한 영향 및 벽체와 슬래브 간의 주철근 항복에 의한 하중 전달 메커니즘이 변화하여 나타나는 영향으로 판단된다.



(a) Schematic of Test

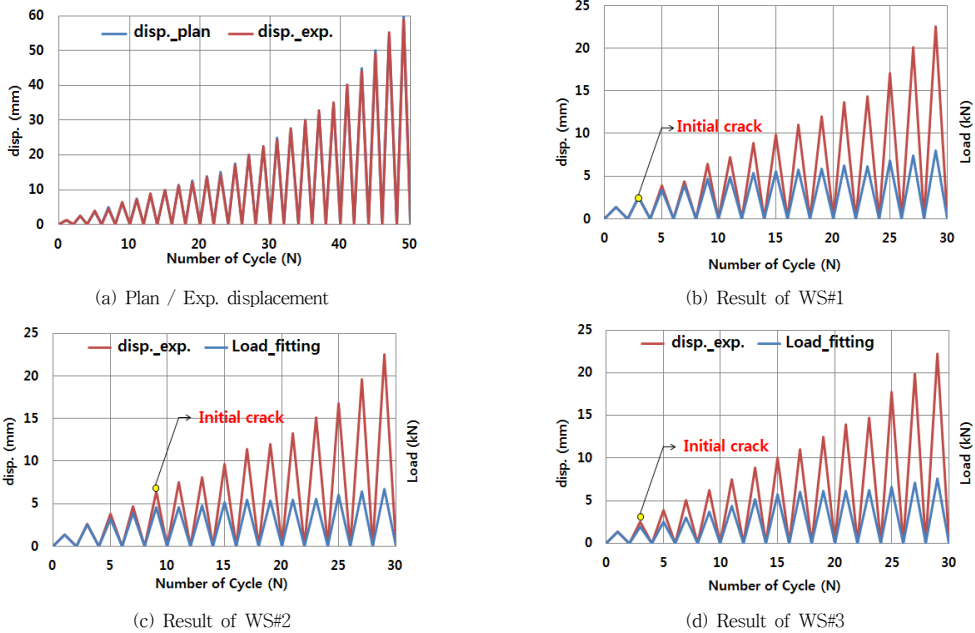


(b) Overview of test setting



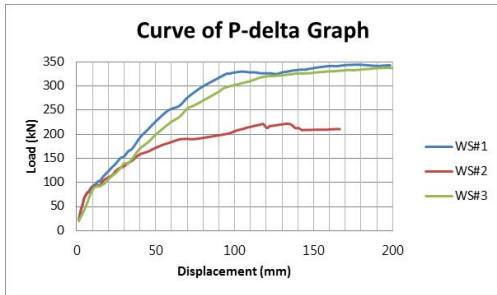
(c) Cyclic loading cycle

[Fig. 3] Test of Wall to Slab Connection



[Fig. 5] Load-displacement curve

전체적인 벽체-슬래브 연결 형태에 따른 실험체 하중 변위 곡선을 Fig. 6에 도식화하였고, 이를 분석해보면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.



[Fig. 6] P-delta graph of Wall to Slab

상부 슬래브와 벽체를 커플러를 사용하지 않고 T볼트만으로 집합(WS#2)한 경우 커플러를 사용한 WS#1,

WS#3에 비해 최대하중이 약 30%이상 줄어들음을 확인할 수 있어, 내진 연성 측면에서는 슬래브 상부 연결부에 커플러 사용이 효율적임을 확인하였다. 연결부의 시공성을 위하여 인장철근, 압축철근 모두 C형 채널과 T볼트의 연결구조를 가질 때, 즉 C형 채널과 T볼트 사이의 유격으로 인한 상대적으로 작은 휨 저항을 하는 구조임을 확인하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 최종 하중 단계에서 우각부에 작용하는 하중이 가장 적게 나타나고 있으며, 이는 채널의 변형에 의한 하중 저항성이 저하되었기 때문으로 판단된다.

WS#1과 WS#3을 비교할 때 벽체의 강선에 의한 프리스트레스력은 내진 연성 측면에서 크게 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 전체적으로 우각부의 연결구조를 살펴볼 때, 힌지 연결 형태의 WS#2보다 강결 연결에 유사한 WS#3 형태가 벽체에 휨 모멘트 전달이 용이하며, 내진 연성도도 우수함을 확인할 수 있었다.

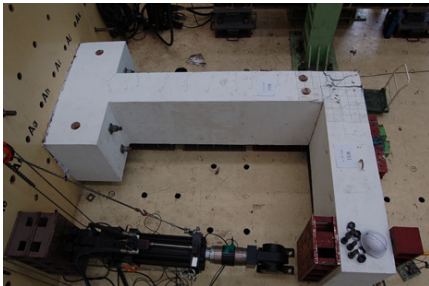
[Table 3] Load-displacement of Wall-Slab types

Type	Maximum load (kN)	Actuator displacement of maximum load (mm)	Step 29 (Loaded displacement 80mm)		
			Load(kN)	Disp.(mm)	Crack width of upper slab(mm)
WS #1	344.14	179.43	291.92	79.40	2.40
WS #2	221.57	132.38	174.75	79.08	10.83
WS #3	337.94	196.00	245.00	80.09	5.61

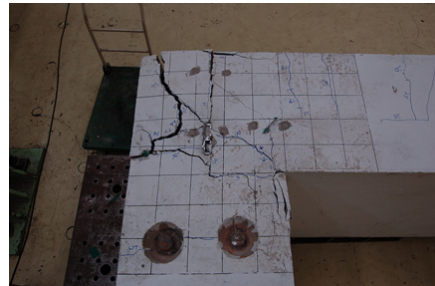
3.2 균열결과

액츄에이터의 수평방향 가력에 따른 휨 모멘트 실험 결과, 다양한 벽체-슬래브 연결부에 대한 최종 균열 형상은 Fig. 7~9와 같다.

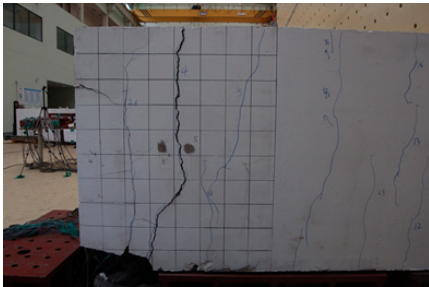
또한 균열폭 측정은 Fig. 10과 같으며, Fig. 11은 최종 단계에서의 균열 및 철근 응력 상태를 나타낸 것이다.



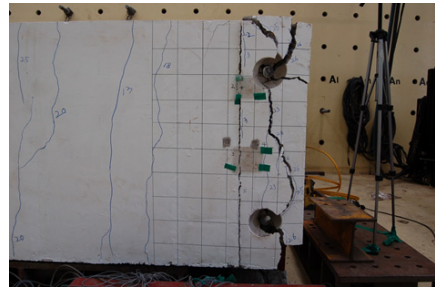
(a) Overall of WS#1



(b) Crack detail

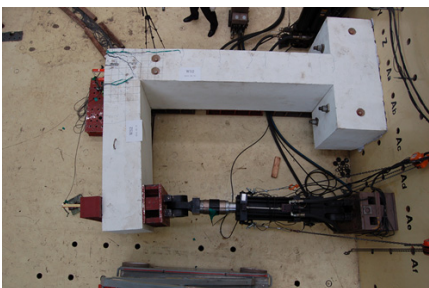


(c) Wall

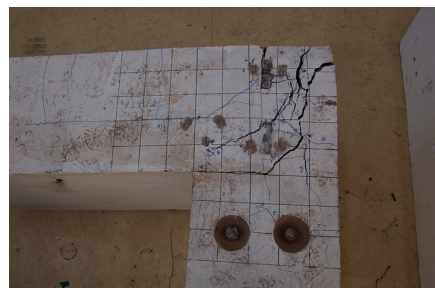


(d) Slab

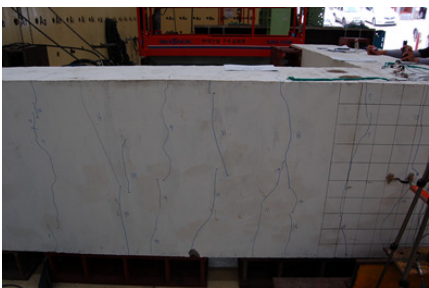
[Fig. 7] Crack of WS#1 (PS + Coupler)



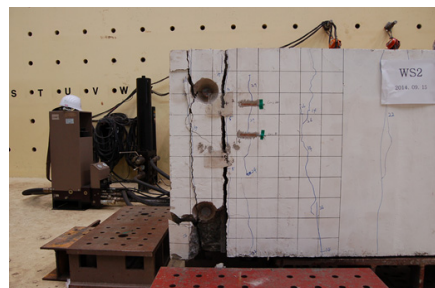
(a) Overall of WS#2



(b) Crack detail

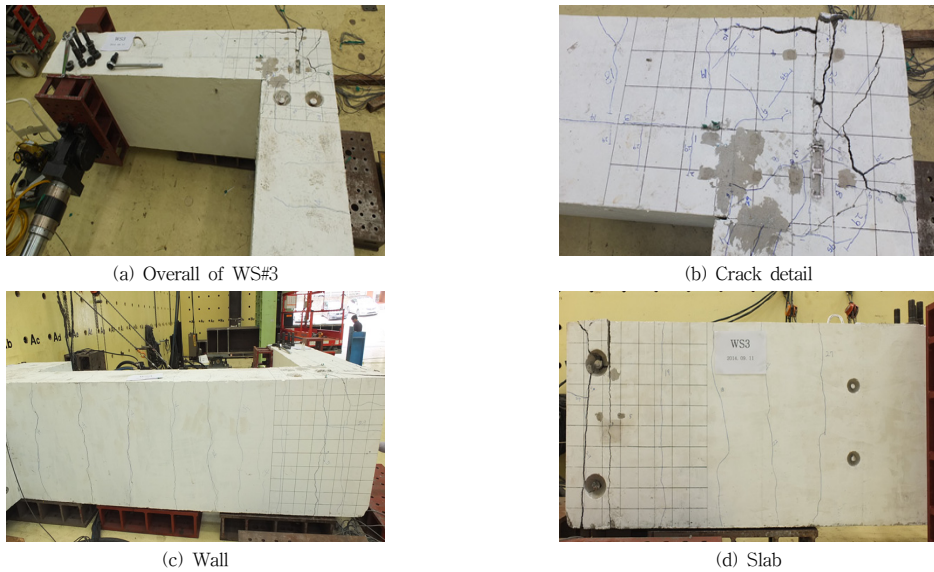


(c) Wall

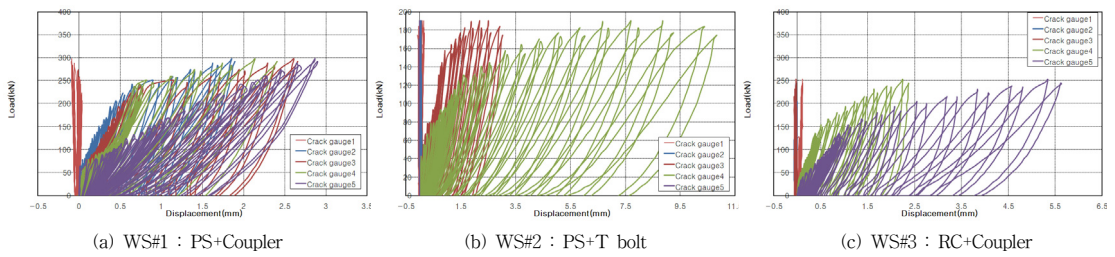


(d) Slab

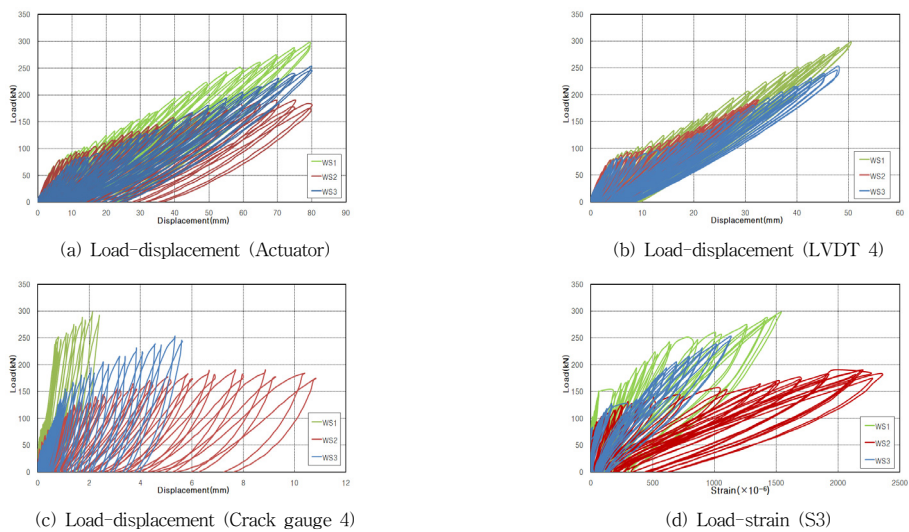
[Fig. 8] Crack of WS#2 (PS + T bolt)



[Fig. 9] Crack of WS#3 (RC + Coupler)



[Fig. 10] Graph of crack gauge



[Fig. 11] Result of Wall-Slab load test (Step 29)

전체적인 균열 진행 패턴을 확인한 결과 벽체와 슬래브 연결부에서 먼저 균열이 발생하고, 우각부 휨 전달에 의한 벽체 휨 균열 발생 후 상부 슬래브 휨 균열이 발생하였다. 특히, 프리캐스트와 현장타설 연결부의 시공 이음부 중 가력방향에 의한 상부 슬래브 상면 연결부에서 균열이 먼저 발생하며(Fig. 7(d), Fig. 8(d), Fig. 9(d)), 우각부 철근에 저항하는 방향으로 균열이 발생함을 확인할 수 있다.

이 결과로부터 본 연구에서 고려한 우각부 연결 형태는 휨 모멘트를 벽체로 전달 가능한 시스템임을 확인하였다. 반면, 상부 슬래브 하면의 프리캐스트와 현장타설 연결부 간에서의 시공 이음부는 하중 가력방향에 의해 압축부로 균열 및 변형이 거의 발생하지 않음을 확인하였다.

우각부 연결구조가 프리캐스트와 현장타설 접합부 형태이므로 우각부 균열이 45° 방향으로 진행되어 충분한 우각부 철근의 배치가 필요하며, 상부 슬래브 휨 균열은 커플러를 적용한 WS#1, WS#3이 채널을 적용한 WS#2보다 약 10% 이상 증가함을 확인하였다. 이는 슬래브 상면/하면 모두 C형 채널과 T형 볼트를 적용함으로써 C형 채널과 T형 볼트 유격에 의한 슬립이 발생하여 초기 균열이 늦게 발생하여 우각부에서 변형이 허용됨으로써 상부 슬래브 및 벽체 균열이 적게 발생하였다.

4. 결론

저심도의 지하구조물을 모듈식으로 적용하기 위하여 가시설 역할을 대체하는 강성벽체와 슬래브 연결부 구조에 대하여 내진성능 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 프리캐스트 벽체와 상부 슬래브 연결을 위한 우각부 연결 구조 실험 결과, 반복하중에 의한 휨 모멘트 전달 가능 구조임을 확인하였다.
- 2) 연결부 구조 중 휨 지배를 받는 상부에서는 채널형태보다는 휨 저항 성능이 우수한 커플러 조합이 휨 저항 성능이 30% 정도 증가하여 유리한 것으로 판단된다.
- 3) 벽체 강선의 긴장 여부는 우각부 휨 저항 성능에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

- 4) 본 연구에서 제안한 우각부 연결 구조는 슬래브 상면 접합부 균열 제어를 위한 보강이 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 프리캐스트와 현장타설 경계면의 전단기, 지하구조물 누수 방지 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] J.R. Shin, A.H. Lee, C.S. Lim, J.S. Lee, D.W. Kim, D.H. Kim, The Concept of Open-cut Modular Construction Method for Near-surface Transit, 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 89 (KSR2014A042), 2014.
- [2] J.K. Lee, J.S. Lee, S.H. Lee, H.S. Kim, Performance Test of Modular Structure Joint for Near-surface Transit, 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, Jeju, pp. 146 (KSR2014A0180), 2014.
- [3] H.S. Kim, J.S. Lee, J.K. Lee, J.S. Yi, Structural Analysis of Precast Box Connection/Joint for Near-surface Transit, 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, Jeju, pp. 153 (KSR2014A0196). 2014.
- [4] S.Y. Lee, J.J. Song, H.Y. Kim, Y.H. Lee, J.M. Lee, Study on the Shape of a Longitudinal Joint of the Slab-type Precast Modular Bridges, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 16(5), pp. 98-111, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.5.098>
- [5] K.S. Kyung, H.H. Lee, J.C. Jeon, K.H. Cho, A Study on Structural Behaviour at Rigid Connection of Rahmen-Type Hybrid Bridge, Journal of Korean Society of Civil Engineers, 23(4A), pp. 687-694, 2003.
- [6] ACI 550.2R-13, Design Guide for Connection in Precast Jointed Systems, American Concrete Institute, 2013.
- [7] P. Negro, G. Toniolo, Design Guidelines for Connections of Precast Structures under Seismic Actions, JRC Scientific and Policy Reports, European Commission, 2012.

이 준 경(Jun-Kyoung Lee)

[정회원]



- 2010년 8월 : 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 (토목학사)
- 2012년 8월 : 서울대학교 공과대학 원 토목공학과 (토목석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : 현대건설 연구개발본부

<관심분야>
토목구조

김 희 성(Hee-Sung Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목환경공학과 (토목학사)
- 2005년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (토목석사)
- 2005년 2월 ~ 2008년 11월 : (주)서영엔지니어링
- 2009년 3월 ~ 2012년 10월 : (주)엔비코컨설팅
- 2013년 7월 ~ 현재 : 현대건설 연구개발본부

<관심분야>
토목구조, 장대교량

이 종 순(Jong-Soon Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목환경공학과 (토목석사)
- 2008년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (토목박사)
- 2005년 3월 ~ 2012년 5월 : (주)교량고속철도 부설연구소 (책임연구원)
- 2012년 5월 ~ 현재 : 현대건설 연구개발본부

<관심분야>
토목구조, 철도교량

이 성 형(Sung-Hyung Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국산업기술대학교 공과대학 기계공학과 (기계학사)
- 2009년 2월 : 한국산업기술대학교 공과대학 기계공학과 (기계석사)
- 1996년 5월 ~ 현재 : 현대건설 연구개발본부

<관심분야>
기계구조