

바이모달 트램(Bimodal Tram) 전용교량에 적용된 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 거동특성 분석에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experiment and Analysis of Precast Concrete Baseplate on Bimodal Tram Dedicated Bridge

천 주 현¹⁾ 주 영 종²⁾ 김 량 균³⁾ 윤 희 택^{4)*}
Cheon, Ju Hyoun Joo, Young Jong Kim, Ryang Gyun Yoon, Hee Taek

Abstract

To purpose of this study is to develop the new type of precast concrete baseplate which is only for bimodal tram. The experiments with real size specimens, which are hollowed precast baseplate, prove the efficacy of new designed baseplate by comparing with the result of RCAHEST. Through tests progressed according to different loading locations, the specimens show the stability by the safety factor of 8~9. Also the results of RCAHEST that is the nonlinear finite element method program, appropriately estimate the occurring crack on concrete, yielding reinforcement and ultimate behavior at failure.

Keywords : Bimodal tram, Precast concrete baseplate, RCAHEST, Safety evaluation.

1. 서론

현재 네덜란드와 프랑스에 이어 세계에서 3번째로 2003년 착수한 바이모달 트램 개발은 버스의 경제성과 유연성, 그리고 철도의 정시성을 접목하여 저비용 고품질의 대중교통 시대를 열어나가며 또한 대중교통 활성화, 교통 약자의 이동 편의 제공 등 정부정책의 실현을 목적으로 건설교통부의 교통체계 효율화 사업(06교통핵심 B01)을 통해 국내 기술을 통한 개발이 추진되고 있는 상황이다. 이러한 신교통 수단인 바이모달 트램은 차량 하부에 설치된 감지 센서를 통해 전용 선로 바닥에 매설된 자석 마커와 통신하여 자동으로 주행하며 친환경적으로 구성된 고정선로를 통해 도시 미관 증진 및 열섬효과 감소, 교통 소음 흡수 등의 효과를 지닌다. 또한 내연기관과 배터리를 결합한 하이브리드 전기 추진 시스템으로 구동되기 때문에 기존 버스에 비해 소음 및 배기가스가 획기적으로 줄어들고 연비도 크게 개선되는 장점이 있다. 이

러한 바이모달 트램은 그 목적에 따라 도심지에 설치하게 되므로 그 연구 결과에 있어서 충분한 안정성을 확보하되 급속시공이 원할 하며 주변 환경에 최소의 피해를 주는 교량 상부구조를 목표로 급속시공이 가능한 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 이용하도록 하였다.

현재 프리캐스트 바닥판을 이용한 합성형 교량은 독일에서 처음 시도되어 미국, 일본, 유럽 등 외국에서 상당히 보편화되어 있으며 국내에서도 '프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 개발 및 실용화(1997~2000)', '인장을 받는 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 거동(이필구 등, 2000)', '프리스트레스를 도입한 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판의 편칭전단강도(정철현 등, 2002)' 및 '프리캐스트 장지간 바닥판의 정적 및 피로거동(정철현 등, 2003)'에 관한 연구 등 많은 연구 결과를 바탕으로 이에 대한 기술력을 갖춘 상태이다.

한편, 본 연구에서는 바이모달 트램이 차량 하부에 설치된 감지 센서를 통해 전용 선로 바닥을 운행한다는 특

1) 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사 수료
2) 정희원, 성균관대학교 조교총장대교량학과 석사 과정
3) 정희원, 현대엔지니어링 차장
4) 정희원 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단

* Corresponding author : htyoon@krri.re.kr 031-460-5383

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

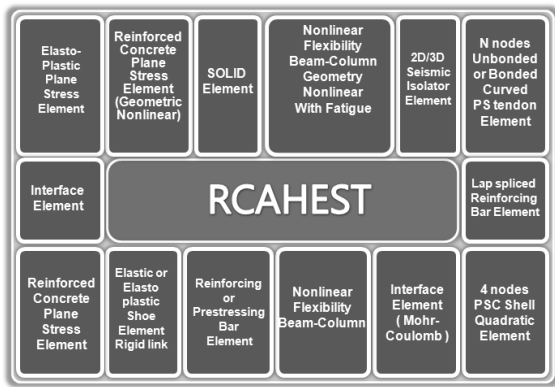


Fig. 1 Element Library

성을 설계에 반영하여 기존의 프리캐스트 바닥판과는 달리 차량 운행 선로 이외의 부분에 대한 중공화에 따른 경량화로 기존 바닥판에 대하여 20%의 자중을 감소시켰다. 본 연구에서는 이렇게 설계·개발된 바이모달 트램의 전용 교량 상부구조에 대하여 실물 크기의 실험체 2기를 제작하여 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 통한 결과와의 비교·분석을 바탕으로 기존의 프리캐스트 바닥판의 형상변화에 따른 여러 역학적 거동 특성에 대한 분석과 함께 적합성과 안정성에 대한 평가를 수행하고자 한다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램

2.1 비선형 유한요소해석 프로그램

바이모달 트램(Bimodal Tram) 전용교량에 적용된 프리캐스트 바닥판의 균열 전·후의 비선형 거동특성을 예측하기 위한 Fig. 1에 나타난 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)을 사용한다. 비선형 유한요소 해석 프로그램 RCAHEST는 재료적 비선형성을 고려한 재료모델(천주현 등, 2008)과 철근콘크리트 쉘요소(김태훈 등, 2001; Kim., T. H. et al. 2010) 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP에 이식하여 모듈화된 프로그램으로서, 지금까지의 많은 연구결과를 바탕으로, 철근콘크리트 쉘구조물의 역학적 거동 즉, 탄성, 비탄성, 극한 영역 등 전 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계, 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력 추적 등 해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

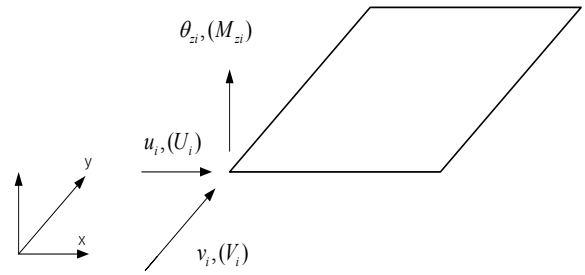


Fig. 2 Plane membrane actions and deformations

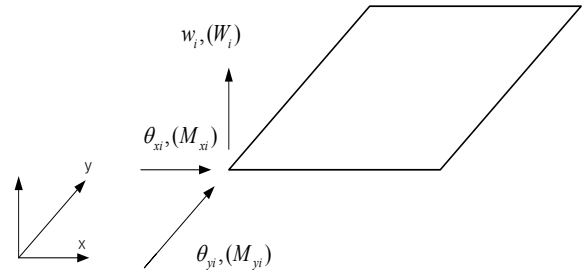


Fig. 3 Bending actions and deformations

2.2 철근콘크리트 쉘요소의 정식화 및 비선형 재료모델

본 연구에서 적용된 철근콘크리트 쉘요소는, Fig. 2와 같은 면내회전강성도(Zienkiewicz and Taylor, 1991)를 갖는 면요소와 Fig. 3과 같은 전단변형이 고려되지 않은 Kirchhoff의 가정에 기초한 판요소를 중첩하여 각 절점에서 6개의 자유도를 갖는 4절점 평면 쉘요소로서(김태훈 등, 2001; Kim., T. H. et al. 2010), 하중의 증분에 따른 인장균열의 진행과 콘크리트의 강도 감소를 자세히 고려하기 위하여 Fig. 4에서와 같은 층상화 기법이 사용되었다. 이는, 부재의 크기에 비하여 두께가 얇은 쉘은 두께방향의 변형은 무시될 수 있으며 쉘요소의 응력상태를 두께방향의 변형을 무시한 2차원 응력상태로 가정하고, 면외방향의 휨모멘트는 각 층에서의 응력을 두께방향으로 적분하고 이를 다시 중립축에 관한 모멘트의 합으로 표현할 수 있다.

균열이 발생한 철근과 콘크리트 구성 방정식은 철근 콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열 직각방향으로 콘크리트 부담하는 인장 응력을 고려하기 위한 인장강성 모델과 균열방향으로의 압축강성 감소를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델이 각각 적용되었으며, 콘크리트 속의 철근 모델은 항복 후 철근만의 특성과 부착효과 등이 동시에 고려되는 모델로 포락선부분에 대한 철근의 항복 후 거동을 일정한 변형경화률을 갖는 것으로 제한한

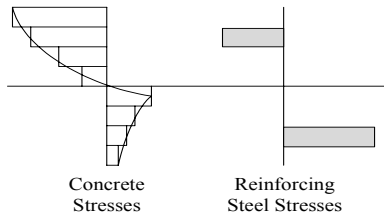
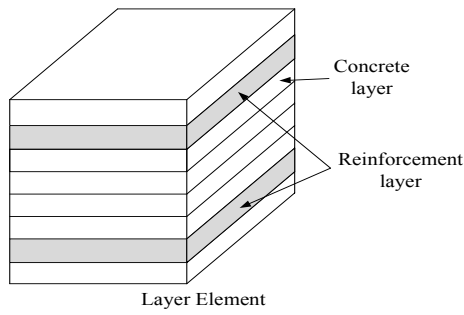


Fig. 4 Layer model and the corresponding stress representation

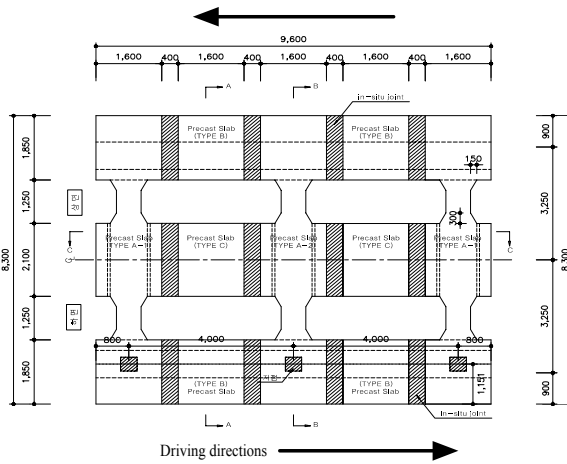


Fig. 5 Plan figure of Specimen

trilinear 모델이 사용되었다(Kim., T. H. et al. 2003).

3. 실험

3.1 실험 계획 및 실험체

바이모달 트램 전용교량의 경우 도심지 시공이라는 특성에 따라 급속시공이 가능한 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 사용하였으며, 여기에 기존 방식과 달리 트램의 하부에 부착된 자동 감지 선세를 통해 고정선로를 운행한다는 특징을 반영하여 자중 경감을 목표로 Fig. 5~Fig. 7에서와 같이 네덜란드 Leonhardt 엔지니어링회사와 현대 엔지니어링이 합작하여 중공화된 프리캐스트 바닥판으로 설계하였다. 이렇게 개발·설계된 신형식 프리캐스트 바

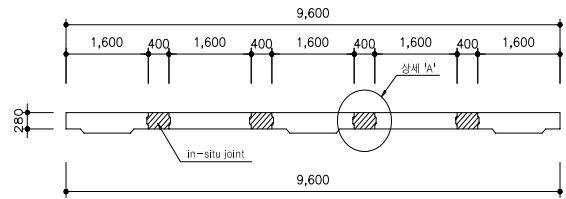
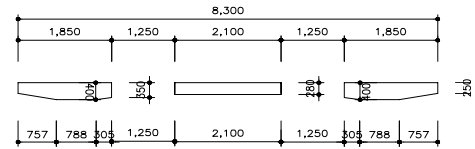


Fig. 6 Side view of Specimen

SECTION A-A



SECTION B-B

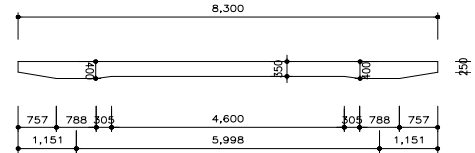


Fig. 7 Front view of Specimen

닥판에 대한 바이모달 트램의 운행에 따른 콘크리트 균열 발생 및 철근의 항복을 포함한 파괴시의 극한거동 특성과 함께 안전성을 평가하기 위하여 총 2기의 실물 크기의 실험체를 제작하여 하중재하 위치에 따른 결과를 비교·분석한다. 제작된 실험체는 Fig. 6에서와 같이 향후 실제 바이모달 트램이 운행될 상·하행선 2차 선로로서 일체화된 이후 가로와 세로의 길이(9,600mm × 8,300mm)가 비슷한 2방향 슬래브로서, 2기의 실험체는 모두 같은 단면 및 배근 상세를 갖으며, 이에 대한 상세 및 재료 물성을 아래의 Fig. 8과 Table 1에 각각 나타내었다. 특히, Table 1에서와 같이 현장 타설부의 콘크리트 강도를 각각 27.8 MPa와 45.3 MPa로 제작하여, 프리캐스트부와 현장 타설부의 콘크리트의 강도 차이에 따른 거동 특성에 대한 비교·분석을 수행한다. 한편, 본 연구에서 제작된 중공화된 프리캐스트 바닥판 실험체는 아래의 Photo 1에서와 같이 향후, 실제 시공에서와 같이 제작 및 운반상의 문제로 인하여, 먼저 각각의 프리캐스트 세그먼트를 제작, 운반하여 이를 거친 한 후, 각 세그먼트 사이 철근의 루프 이음과 함께 현장 타설을 통한 일체화를 이루었다.

3.2 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 설계·제작된 총 2기의 실물 크기의 중공

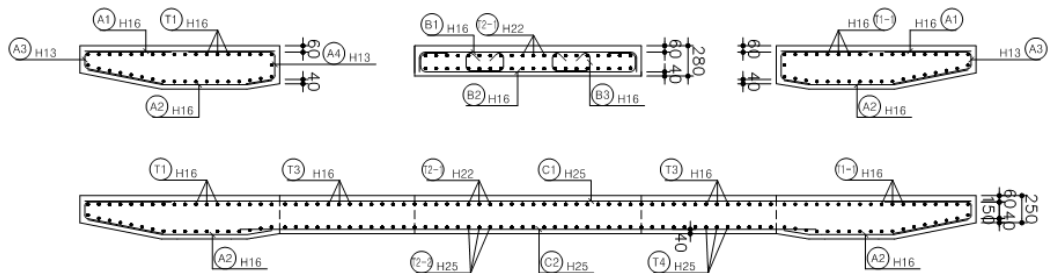


Fig. 8 Detail of reinforcement placing - Front view

Table 1 Source of precast concrete baseplate

Specimen	Size(mm)		Quantity	Cast-in-place part	Precast part, Compressive strength (MPa)	Cast-in-place part Compressive strength (MPa)			
	W	L				W1	W2	W3	W
Specimen1	9,600 × 8,300 × 250/400/350		1	Loop joint	44.86	27.80			
Specimen2	H × L × W(W1, W2, W3)		1	Loop joint	45.20	45.25			
Concrete mix proportions	W/C (%)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
					W	C	S	G	
	31.7	15	4.5 ± 1.5	41.5	165	520	685	973	

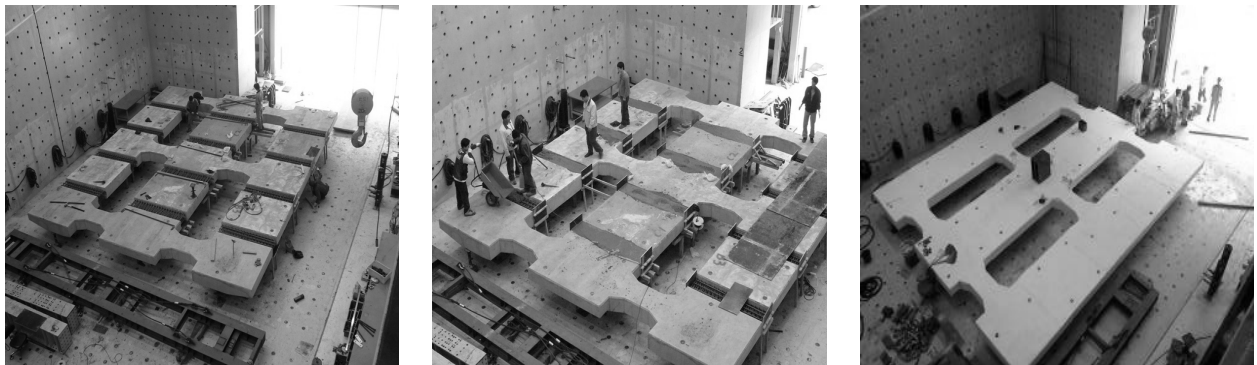


Photo 1 Manufacturing process of the specimens

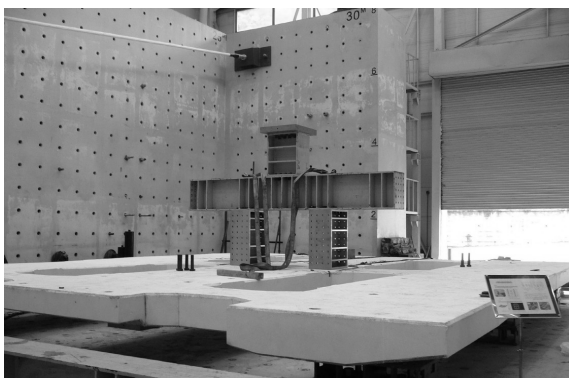


Photo 2 Setup of load - specimen 1

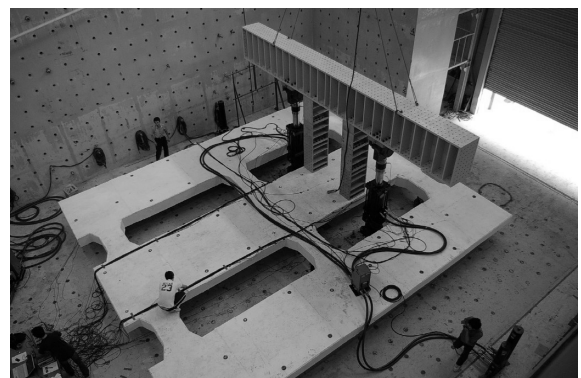


Photo 3 Setup of load - specimen 2

화된 프리캐스트 바닥판 실험체에 대하여 실제 바이모달 트램 운행시 이에 따른 극한거동 특성 및 안전성을 평가하기 위하여 아래의 Photo 2~Photo 3에서와 같이 하중

재하 위치를 변수로 400mm × 600mm의 하중 재하판에 25 kN/min의 증분하중을 재하하면서 실험을 수행하였으며, 총 6개의 받침판을 이용하여 프리캐스트 바닥판 하부

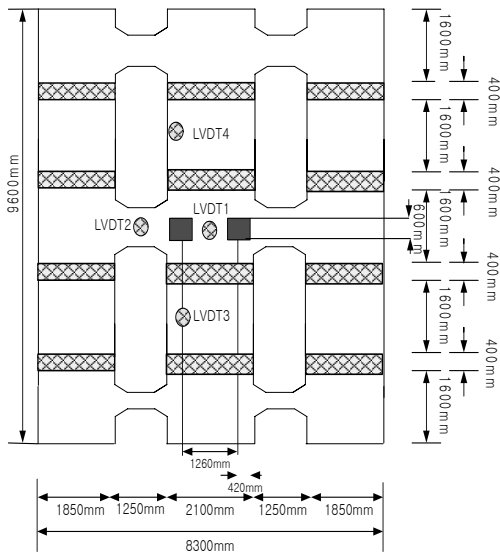


Fig. 9 Load and LVDT location of specimen 1

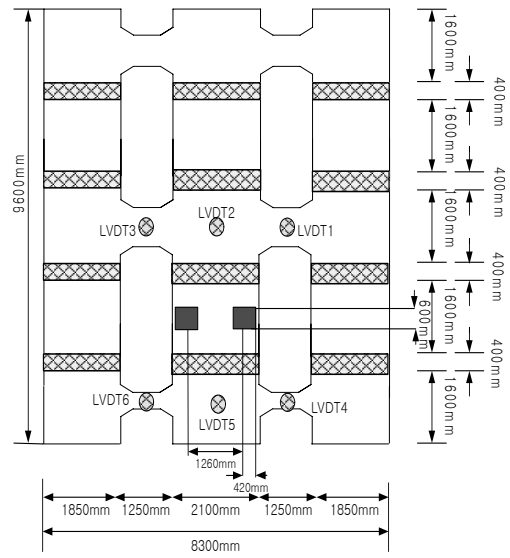


Fig. 10 Load and LVDT location of specimen 2

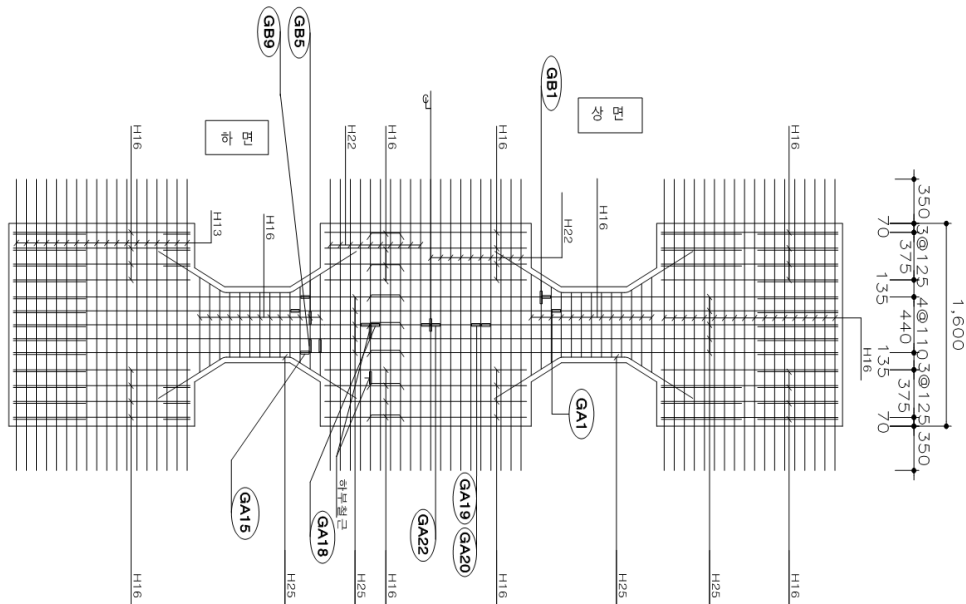


Fig. 11 Location of strain gauges - Specimen 1

구속 효과를 묘사하였다. 하중 증분에 따른 실험체의 처짐에 대한 거동 특성을 분석하기 위하여 각 실험체에서의 하중 재하 위치를 중심으로 Fig. 9~Fig. 10에서와 같은 위치에 LVDT를 설치하였다.

Fig. 11~Fig. 12에서와 같이 현장 타설 이음부 위치에서의 철근의 상·하부 및 인장측 철근 위치에 각각 철근 게이지를 부착하여(교축 방향 GBxx, 교축 직각 방향 GAxx), 현장 타설 이음부에서의 완전 합성여부와 함께 인장 철근의 항복 여부를 파악하였다. 또한, 콘크리트의 상부 및 중공화 단면 측면에 각각 콘크리트 변형률 게이

지를 부착하여 하중 증분에 따른 콘크리트 균열 발생과 함께 균열의 진전 양상 등을 파악하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 하중-변위 비교·분석

본 연구에서 설계·개발된 중공화된 바이모달 트랩 전용 프리캐스트 바닥판의 실험체에 대한 실험과 해석으로부터의 하중-변위 관계와 함께 콘크리트 구조설계기준

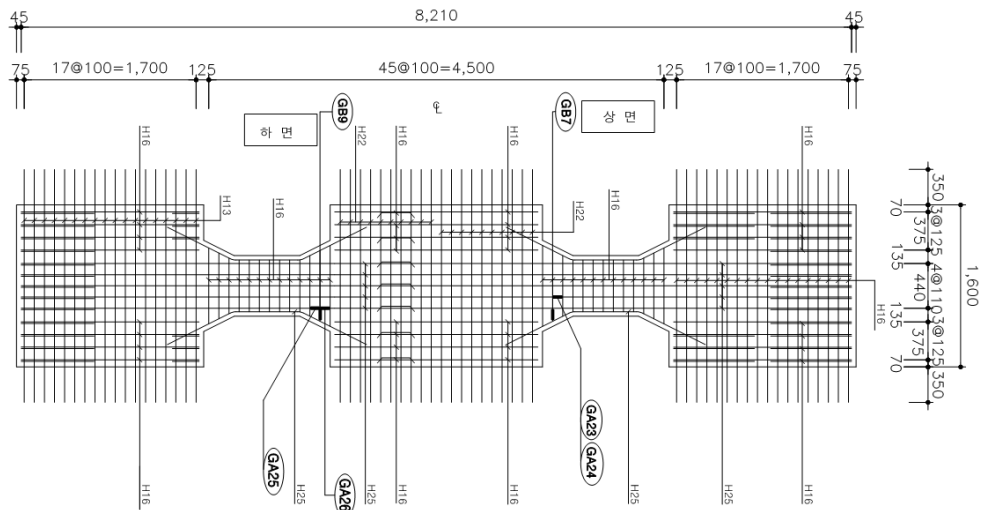


Fig. 12 Location of strain gauges – Specimen 2

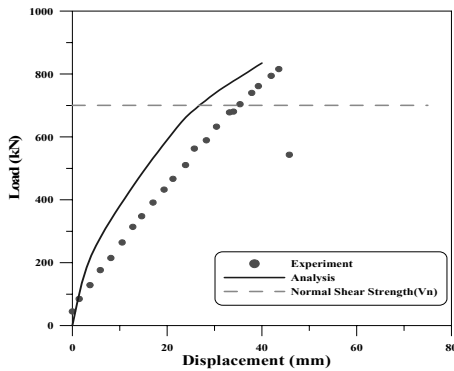


Fig. 13 Load-displacement curve of Specimen 1

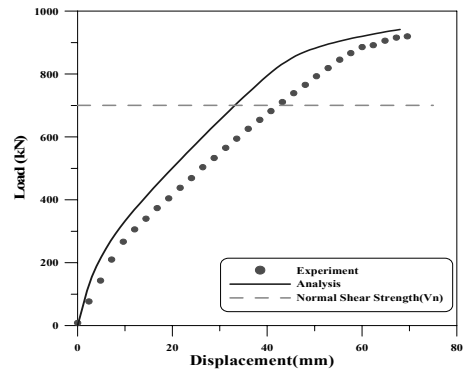


Fig. 14 Load-displacement curve of Specimen 2

Table 2 Result of the Experiment

	Specimen 1	Specimen 2
Design Load	103.5	103.5
Nominal Shear Strength(V_n)	700.5	700.5
Experiment (V_{max})	810.5	930.5
Analysis (V_{max})	878.7	947.2
Exp./Anl.	0.92	0.98
Safety Factor	7.8	9.0

(KCI 2007)에 따라 식(1)~식(4)을 바탕으로 산정된 공칭 강도를 비교하여 아래의 Fig. 13~Fig. 14 및 Table 2에 각각 나타내었다.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (2)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (3)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (4)$$

아래의 결과에서와 같이, 하중 재하 위치에 따른 실험으로부터 파괴시 하중은 각각 810.5kN, 930.5kN으로서 바이모달 트램 설계하중 103.5kN에 비하여 약 7.8~9정도의 안전율과 함께 설계 기준에 따른 공칭강도(Nominal Strength)에 비하여 각각 16%, 32% 이상의 여유를 확보하고 있음 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 설계·개발된 중공화된 프리캐스트 바닥판의 경우 바이모달 트램의 설계하중 하에서 탄성 범위 내의 거동을 하며 충분한 안정성을 확보하고 있음을 확인 할 수 있다.

또한, 이 연구에서 적용한 재료적 비선형성을 고려한 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 극

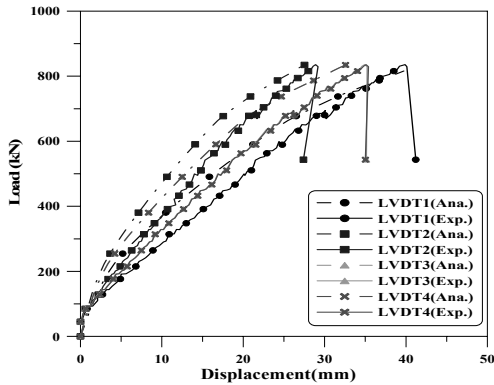


Fig. 15 Load and LVDT curve of Specimen 1

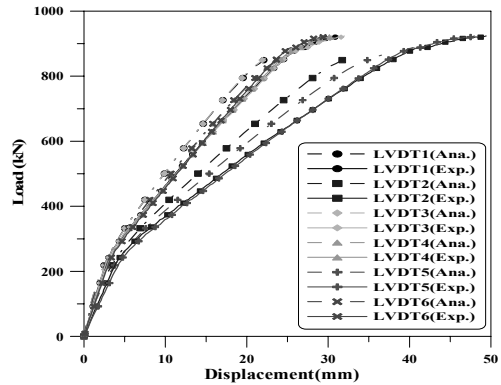


Fig. 16 Load and LVDT curve of Specimen 2

한 강도는 각각 878.7kN과 947.2kN으로서, 실험으로부터 결과에 비하여 평균 5%이내의 오차로 예측하고 있으며 실험체의 초기 균열의 발생과 함께 철근의 항복을 포함한 파괴시까지의 극한 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다.

아래의 Fig. 15~Fig. 16에서와 같이 각 실험체에서의 LVDT위치에 따른 하중 증분과의 결과를 각각 비교하여, 대칭성과 적절성을 확인하였으며 이를 바탕으로 실험 및 해석 결과에 대한 신뢰도를 검증하였다.

4.2 균열 양상 및 철근 변형률 비교·분석

아래의 Photo 4~7에서와 같이 각 실험체 모두 바이모달 트램의 설계하중 103.5kN이상에서 중공화된 모서리 부분 하단부에서 미세한 초기 휨균열이 발생하는 것으로 나타났다. 하중의 증분에 따라 휨균열의 진전과 함께 사인장 균열형태로 발전하여 최종적으로 이러한 균열에 의한 전단 파괴형상을 나타내었다. 이는 일반적인 프리캐스트 바닥판이 휨파괴의 형태를 나타내는 것과 차이를 보이고 있으며 프리캐스트 바닥판의 경량화를 위한 바닥판의 중공화에 따른 모서리 부분에서의 응력집중으로 인한 것으로 판단된다. 이외의 비교·분석을 위하여 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 해석으로부터의 파괴시 손상도를 각각 비교하여 나타내었으며, 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 또한, 아래의 Fig. 17~18에서와 같이 하중 증분에 따른 각 위치에서의 철근 변형률에 대한 결과를 바탕으로, 중공화된 모서리 부분 위치에서의 철근의 항복과 함께 현장 타설 루프 이음부에서의 완전 접합 여부를 확인함으로써 본 연구에서 새롭게 설계·제작된 중공화된 프리캐스트 바닥판에 대한 적용성과 타당성을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 신교통 수단인 바이모달 트램 전용 하부구조 개발을 목표로 바이모달 트램의 운행 특성을 고려한 중공화된 프리캐스트 바닥판을 설계·제작하였으며, 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 해석결과와의 비교·분석을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 바이모달 트램의 운행 특성을 고려하여 설계·제작된 중공화된 프리캐스트 콘크리트 바닥판은 기존의 프리캐스트 바닥판에 비하여 약 20%의 자중 감소로 인한 경제성과 함께 실험 결과를 바탕으로 설계하중에 비하여 약 8~9배의 충분한 안전율을 확보 하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 기존의 프리캐스트 콘크리트 바닥판과 달리 중공화에 따른 모서리 부분에서의 응력 집중으로 해당 위치에서 철근의 항복을 포함한 전단파괴가 발생하였으나, 기존 연구 결과를 바탕으로 파괴시까지의 전체적인 거동특성은 일반적인 콘크리트 바닥판과 유사함을 알 수 있다.
- 3) 본 연구에서 적용한 재료적 비선형성을 고려한 비선형 유한요소해석 프로그램을 통한 해석 결과 콘크리트의 균열을 포함한 철근의 항복과 같은 극한 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다.
- 4) 추후, 연구를 통하여 전단 변형을 고려한 재료적 비선형 모델을 추가함으로써 더욱 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 버스의 경제성과 유연성 및 철도의 정시성을 접목한 신교통 수단인 바이모달 트램 운영을 위한 전용 프

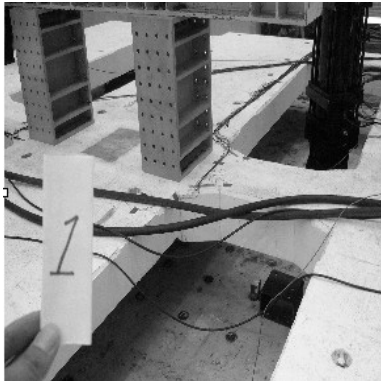


Photo 4 Crack pattern of specimen 1 at failure

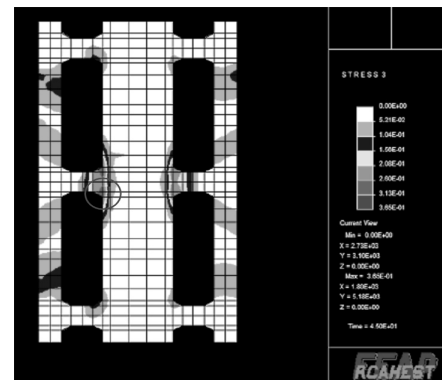


Photo 6 Crack pattern of specimen 2 at failure

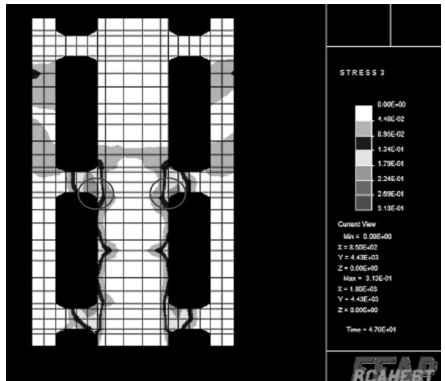
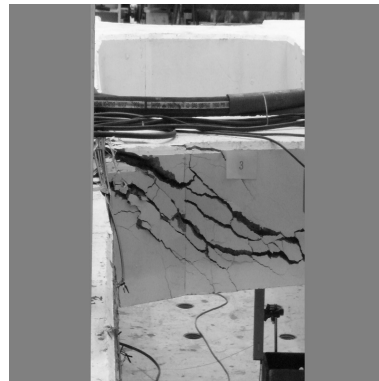


Photo 7 Stress contour at failure (specimen 2)

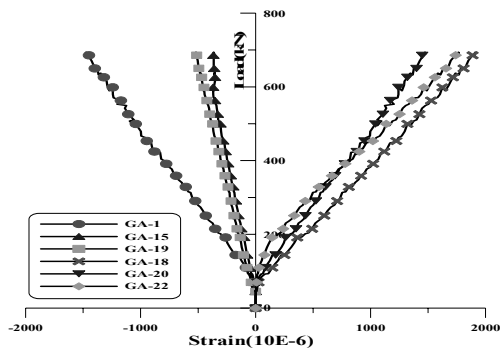


Fig. 17 Load-strain curve of Specimen 1

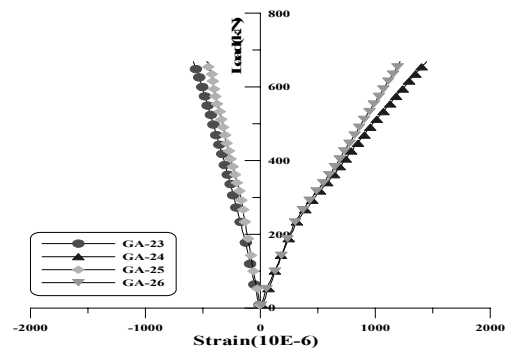


Fig. 18 Load-strain curve of Specimen 2

리캐스트 바닥판을 새롭게 설계·제작하여 그 적용 성과 타당성을 검증하였으며 향후, 선진화된 설계 및 시공 기술 확보를 위한 기초자료로 충분히 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부의 국가교통핵심기술개발사업 (06교통핵심 B01)인 신에너지 바이모달 저장굴절차량 운영시스템 기반기술개발 연구 지원에 의하여 이루어 졌

음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997~2000), “프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 개발 및 실용화”, 연구보고서.
2. 김기호, 천주현, 최정호, 신현목, “성능기반 설계를 위한 철근 콘크리트 구조용 비선형 유한요소 해석프로그램의 신뢰성 평가”, 대한토목학회 2003년도 정기 학술대회, 2005, pp.1141-1144.
3. 김태훈, 김석중, 최정호, 신현목, “구조공학 : 프리스트레스트 콘크리트 셸구조의 비선형 유한요소해석”, 대한토목학회 논문

- 집A, Vol.22 No.4, 2002, pp.769-778.
4. 김태훈, 이상국, 신현복, "회전자유도를 갖는 층상화 요소를 이용한 철근콘크리트 셸구조의 비선형 동적해석", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제6호, 2001, pp.21-27.
 5. 윤희택, 박영근, 장세기, 목재균, "대중교통체계에서 바이모달 트램의 기능과 역할", 한국철도학회 2008년 춘계 학술대회 논문집, 2008, pp.2443-2446.
 6. 이필규, 심창수, 장승필, 정철현, "인장을 받는 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 거동", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제1권, 2000, pp.643-646.
 7. 정철현, 류형근, 정운용, 김인규, "프리스트레스를 도입한 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판의 편칭전단강도", 콘크리트학회 논문집, Vol.14, No.5, 2002, pp.653-659.
 8. 정철현, 이한주, "프리캐스트 장지간 바닥판의 정적 및 피로거동", 대한토목학회 논문집, 제23권, 제4A호, 2003, pp.721-731.
 9. 천주현, 김기호, 상대정, 박재근, "비선형 유한요소해석 프로그램을 이용한 철근콘크리트 기둥부재의 합리적인 극한강도 평가 방안", 한국구조물진단학회지, 제12권, 제4호, 2008, pp.133-140.
 10. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 기문당, 2007.
 11. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y. and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake I: Theory and Formulation", Journal of Structural Engineering, ASCE, V.129, No.9, 2003, pp.1199-1207.
 12. Kim, T. H., Park, J. G., Choi, J. H. and Shin, H. M., "Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Shell Structures", Structural Engineering and Mechanics, Vol.34, No.6, 2010, pp.685-702.
 13. Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2 User Manual, Volume 2., 2000,
 14. Zienkiewicz, O. C. and Talyor, R. L., The Finite Element Method, vol.2-Solid and Fluid Mechanics, McGraw Hill Book Co., 1991, 4th ed., pp.111-286.
- (접수일자 : 2010년 10월 15일)
(수정일자 : 2010년 12월 23일)
(심사완료일자 : 2010년 12월 30일)

요 지

본 연구에서는 현재 신교통 수단으로 연구 중인 바이모달 트램의 전용 교량을 개발하는데 있어 바이모달 트램 운행 특성을 고려한 실물크기의 중공화된 프리캐스트 바닥판을 새롭게 설계·제작하여, 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 해석 결과와의 비교·분석을 바탕으로 적합성과 타당성을 검증하였다. 하중 재하 위치를 변수로 실험을 수행하여 설계 하중에 비하여 약 8~9배의 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인하였으며, 본 연구에서 적용한 재료적 비선형성을 고려한 비선형 유한요소해석 프로그램을 통한 해석 결과 역시 콘크리트의 균열 발생 및 철근의 항복을 포함한 파괴시까지의 극한 거동 특성을 비교적 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다.

핵심 용어 : 바이모달 트램, 프리캐스트 콘크리트 바닥판, RCAHEST, 안전성 평가.