

# 프리캐스트 바닥판 이음부의 유한요소해석 Finite Element Analysis of Precast Deck Joints

## 1. 서론

기존 교량의 노후화로 인해 신설뿐만 아니라 교체 및 보수보강 등 유지관리의 중요성이 점차 증가하고 있는데, 현재 기존 교량 바닥판의 교체 및 신설되는 현장타설 바닥판의 경우 보수 및 교체의 어려움, 공기 및 인건비 증가, 초기균열 우려 및 간접 비용 증가 등 여러 문제점을 내포하고 있다. 반면에 사전에 공장제작 후 현장 조립되는 프리캐스트 콘크리트 바닥판 공법은 공장제작으로 품질확보, 공기단축을 기대할 수 있어 기존 현장타설 바닥판의 효과적인 대안으로 평가받고 있다. 이러한 프리캐스트 바닥판은 바닥판간 이음부의 연결방법에 따라 구조물의 성능이 좌우되므로, 강도 및 사용성 등을 확보할 수 있는 경제적인 급속시공이 가능한 바닥판 간 이음부 연결 기술이 중요하다. 본 연구에서는 프리캐스트 바닥판 급속시공 기술개발을 통해 바닥판 간 이음부 연결기술을 제안하고 다양한 형식에 대한 요소실험체를 제작 후 휨성능 실험과 유한요소해석의 결과분석 및 비교를 통해 성능을 검증하려고 한다.

이번 소고에서는 프리캐스트 바닥판간 이음부의 비선형 유한요소해석 방법의 검증을 위해 요소실험체와 동일하게 모델하고 실험결과와 해석결과를 비교·분석하여 비선형 해석의 타당성을 확인하려고 한다.

## 2. 실험모델

### 2.1 실험체 구성

프리캐스트 바닥판 이음부의 거동 및 내력평가를 위해 일체형 RC보, Loop 이음 및 Headed Bar 이음 등 3개 형식의 실험체에 대해 휨 성능 구조실험을 수행하였다. 실험체는 길이 2,200mm, 폭 800mm, 두께 250mm로 제작되었으며, 실험체의 종류 및 각 실험체의 연결상세는 각각 표 1 및 그림 1과 같다. Headed Bar 실험체의 경우는 이음부의 부착성능 향상을 위해 경계면을 요철형으로 제작하였다(그림 2 참고).

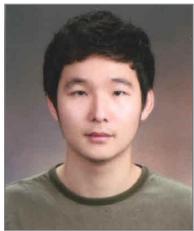
표 1 실험체 종류

실험부재	이음부 폭 (mm)	이음부 형식	이음부 경계면 형상
RC	-	-	일자형
Loop 200	200	Loop	일자형
Loop 300	300		
HB 300	300	Headed Bar	요철형



정철현

단국대학교 토목환경공학과 교수



강명구

단국대학교 토목환경공학과 석사과정



김인규

대우건설기술연구원 수석연구원



신동호

대우건설기술연구원 선임연구원

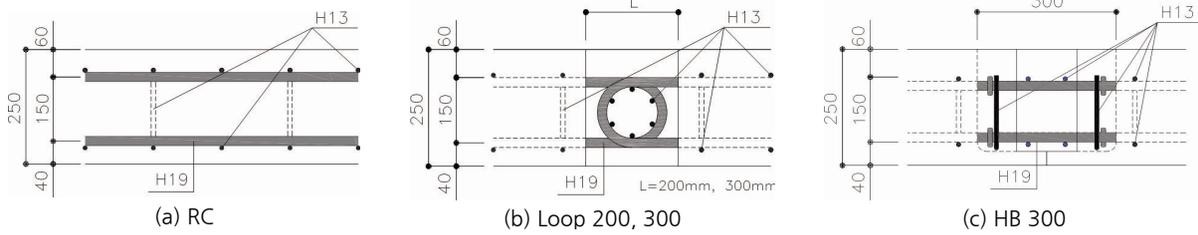


그림 1 실험체의 연결상세



그림 2 Headed Bar 이음의 평면형상

## 2.2 실험결과 요약

실험은 4절점 휨 실험으로 실험체 파괴 시까지 변위제어로 수행되었으며, 그림 3과 같이 재하하중은 지점으로부터 700mm 떨어진 곳에서 실험을 수행하였다. 표 2에 각 실험체의 초기균열하중, 최대하중 및 최대하중이 작용했을 때의 변위를 비교하였다.



그림 3 실험체 하중재하

표 2 실험 결과

구분	균열하중 (kN)	최대하중 (kN)	최대하중에서의 변위 (mm)
RC	65	470	28
Loop 200	71	350	25
Loop 300	72	400	38
HB 300	67	452	21

## 3. 유한요소해석

### 3.1 모델 구성

각 실험체에 대해 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 실험체는 콘크리트, 무수축 모르타르, 철근으로 구성되며, 콘크리트와 무수축 모르타르는 8절점 Solid 요소(C3D8R), 철근은 Truss 요소(T3D2)를 사용하여 모델링하였다. 콘크리트와 철근은 완전 부각으로 가정하였다. 실험체의 유한요소모델은 그림 4와 같다.

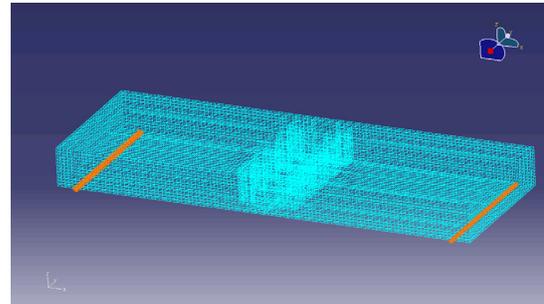


그림 4 유한요소모델

#### 3.1.1 콘크리트

콘크리트의 비선형 재료특성은 ABAQUS에 내장되어 있는 Concrete Damaged Plasticity 모델을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도는 공시체 강도인 36MPa를 적용하였으며, 콘크리트의 압축응력-변형률 관계는 Hognestad 응력-변형률 곡선을 이용하였다(Hognestad, 1951). 콘크리트의 선형 탄성 구간은 콘크리트 설계기준 압축강도의 30%로 가정하였고 그때의 강도를 할선탄성계수법을 이용하여 콘크리트의 탄성계수를 결정하였다(Bangash, 1989). Hognestad는 다음의 식 (1)과 같이 최대 압축강도를 기준으로 콘크리트 응력 변형률 곡선을 나타내었다. 본 해석에서는 최대 압축강도에서의 변형률  $\epsilon'_0 = 0.0025$ , 극한 변형률  $\epsilon_{cu} = 0.0033$ 으로 가정하였다.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon'_0} \left( 1 - \frac{\epsilon}{2\epsilon'_0} \right) \quad 0 < \epsilon < \epsilon'_0 \quad (1a)$$

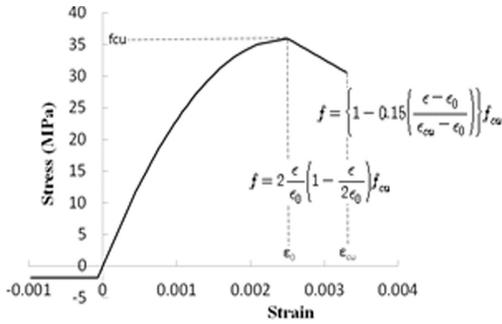


그림 5 콘크리트 응력-변형률 곡선

표 3 콘크리트 재료 특성

최대 압축강도 (MPa)	최대 인장강도 (MPa)	$\epsilon_0'$	$\epsilon_{cu}$	탄성계수 (MPa)
36	1.8	0.0025	0.0033	26447

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon - \epsilon_0'}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0'} \right) \quad \epsilon_0' < \epsilon < \epsilon_{cu} \quad (1b)$$

콘크리트의 인장 특성은 완전 탄소성 모델을 사용하였으며, 콘크리트의 최대 인장강도를 설계기준압축강도의 5%로 가정하였다(Chen, 1982). 표 3은 유한요소해석에서 사용된 콘크리트의 재료 특성이며, 이를 적용한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 그림 5와 같다.

### 3.1.2 무수축 모르타르

무수축 모르타르의 압축강도는 공시체 강도인 48MPa를 사용하였으며, 응력-변형률 관계는 Kaushik 등(2007)의 연구결과를 참고하였다. Kaushik 등(2007)의 연구에서 모르타르의 최대 압축강도에서의 변형률( $\epsilon_0$ )은 0.010~0.013, 극한변형률( $\epsilon_{cu}$ )은

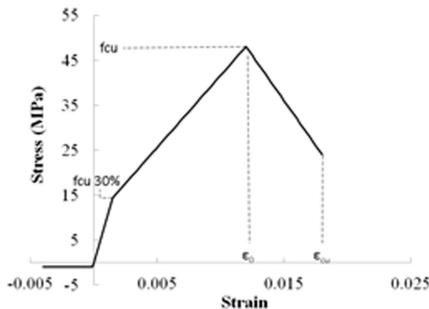


그림 6 무수축 모르타르 응력-변형률 곡선

표 4 무수축 모르타르 재료 특성

최대 압축강도 (MPa)	최대 인장강도 (MPa)	$\epsilon_0'$	$\epsilon_{cu}$	탄성계수 (MPa)
48	0.96	0.012	0.018	9600

0.017~0.019로 나타났으며, 모르타르의 탄성계수는 식 (2)와 같이 압축강도의 200배로 평가되었다. 따라서 본 해석에서는 이를 참고하여 무수축 모르타르의 최대 압축강도에서의 변형률 및 극한변형률을 각각  $\epsilon_0' = 0.012$ ,  $\epsilon_{cu} = 0.018$ 로 가정하였으며, 탄성계수는 9600MPa로 하였다.

$$E_m = 200f_{ck} \quad (2)$$

선형 탄성 구간은 무수축 모르타르 압축강도의 30%로 가정하였으며, 인장강도는 압축강도의 2%로 하여 완전 탄소성 모델을 적용하였다. 유한요소해석에서 사용된 무수축 모르타르의 재료 특성은 표 4와 같으며, 이를 적용한 무수축 모르타르의 응력-변형률 관계는 그림 6과 같다.

### 3.1.3 철근

실험체에 사용된 철근의 항복강도는 400MPa이며, 식 (3)에 나타난 Hsu(1992)의 이론에 따라 철근의 재료특성은 Plastic Bi-linear model로 가정하였다. 해석에 사용된 철근의 재료 특성은 표 5 및 그림 7과 같다.

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad f_s \leq f_y' \quad (3a)$$

$$f_s = f_0' + E_p' \epsilon_s \quad f_s > f_y' \quad (3b)$$

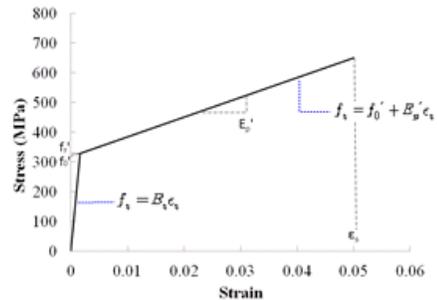


그림 7 철근 응력-변형률 곡선

표 5 철근 재료 특성

$f_s (f_s \leq f_y')$ (MPa)	$f_s (f_s > f_y')$ (MPa)	$f_y'$ (MPa)	탄성계수 (MPa)
344.34	619.31	344.34	200,000

### 3.1.4 접촉조건

본 해석에서는 콘크리트 본체와 무수축 모르타르와의 이음부 경계면에서 접촉 조건을 적용하였다. 그림 8과 같이 이음부 부착력의 접선 방향, 법선 방향의 부착강도 및 부착파괴 후 응력 변화를 고려하였다. 해석에 적용된 부착강도는 변수해석을 통해 0.5MPa로 하였다.

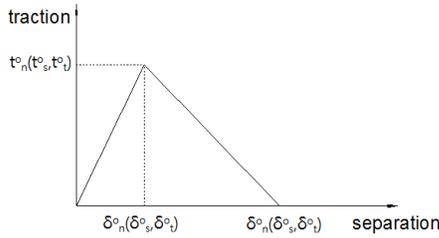


그림 8 부착강도 및 부착파괴 후 변화 관계

### 3.2 해석결과

유한요소해석에 의한 실험체의 변형형상은 그림 9와 같다. 하중 재하 초기에 이음부에서 부착파괴가 발생하였으며, 이음부 벌어짐이 진행됨에 따라 콘크리트 본체가 최대 인장강도에 도달하는 모습을 보였다.

각 실험체에 대하여 실험과 해석결과의 하중-변위 관계를 그림 10에 비교하였다. 실험과 해석의 전체적인 하중-변위 관계는 유사한 결과를 보였다. 표 6 및 표 7에 유한요소해석 결과와 실험결과의 초기균열하중 및 최대하중을 비교하였다. 실험결과와 해석결과의 차이는 모두 10%이내로 나타났다.

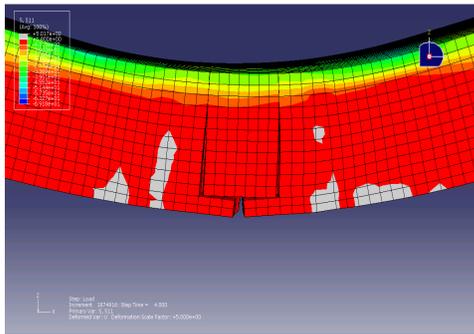
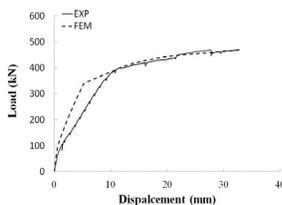


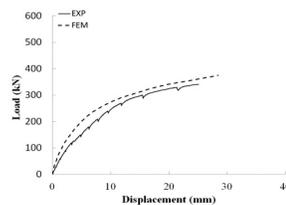
그림 9 유한요소 변형 형상(HB 300)

표 6 균열하중 비교

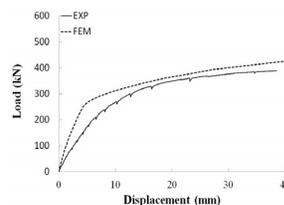
실험부재	초기균열하중(kN)		오차율 (2)/(1)
	EXP (1)	FEM (2)	
RC	65	64	+1.54%
Loop 200	71	68	+4.23
Loop 300	72	68	+5.56%
HB 300	67	68	-1.49%



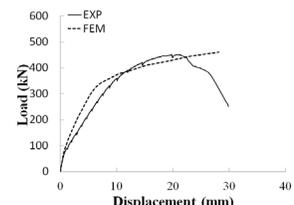
(a) RC1



(b) Loop 200



(c) Loop 300



(d) HB 300

그림 10 실험체별 하중-변위 곡선 비교 실험체의 연결상세

표 7 최대하중 비교

실험부재	최대하중 (kN)		오차율 (2)/(1)
	EXP (1)	FEM (2)	
RC	470	468	+0.4%
Loop 200	341	374	-9.68%
Loop 300	389	425	-9.2%
HB 300	452	478	-5.75%

## 4. 결 론

프리캐스트 바닥판간 이음부 형식에 따른 휨성능 평가 요소 실험을 수행하였으며, 실험결과를 토대로 이음부 경계면의 접촉조건을 포함한 비선형 유한요소해석을 실시하였다. 실험 및 해석결과의 전반적인 거동 및 경향이 유사하게 나타나 향후 바닥판 이음부의 변수해석 연구 등에 본 연구에서 제시된 해석방법은 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었음.

## 6. 참고문헌

1. ABAQUS User's Manual version 6.8, Dassault Systemes Simulia Corp, 2008.
2. Bangash, M. Y. H., Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Application, Elsevier Applied Science, 1989.
3. Hsu, T. T. C., Unified Theory of Reinforced Concrete, CRC Press, 1992.
4. Hognestad, E. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill, 1952.
5. Kaushik, Hemant B. Durgesh C. Rai, Sudhir K. Jain, Stress-Strain Characteristic of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 19, No. 9, September 1, 2007.
6. Chen, W. F., Plasticity in reinforced concrete, McGraw-Hill, 1982. [R]

[섭외: 심성한 편집위원]