

# 프리캐스트 장지간 바닥판의 정적 및 피로실험

## Experimental Study on the Long Span Precast Decks

이 한 주\* 이 용 우\*\* 정 철 현\*\*\* 김 인 규\*\*\*\* 전 세 진\*\*\*\*\* 정 운 옹\*\*\*\*\*  
Lee, Han Joo Lee, Young Woo Chung, Chul Hun Kim, In Gyu Jeon, Se Jin Jeong, Un Young

### ABSTRACT

Transverse prestressing of bridge decks is an attractive concept with substantial benefits in both economy and crack control in slabs. To evaluate the necessary information for the prestressed long span bridge slab design, a series of static and fatigue tests were performed. It is shown that the minimum thickness recommendation in Korean Highway Bridge Design Code is too conservative.

### 1. 서 론

최근 들어 PSC 바닥판을 갖는 강합성 2주형교는 구조가 간소하고, 시공의 기계화도 가능하며 또한 유지관리가 용이하고, 경제성 및 내구성 향상이 가능한 교량구조 형식의 하나로 주목받고 있다. 일본과 스위스, 프랑스 등 유럽에서는 많은 시공사례가 있는 일반화되어 있는 형식이지만, 국내에서는 연구의 시작단계이다. 현재 국내에서 바닥판 설계시 바닥판 지간은 기존 판형교에서는 3.5m 이하였으나, 2주형교에서는 최소 5m 이상으로 지간이 증대하므로 이를 적용하기 위해서는 현재의 바닥판 설계법에 대한 검토가 필요하다. 즉, 현행시방서에 의해 장지간 바닥판을 설계하는 경우, 바닥판의 두께가 과다해지는 최소두께 규정 및 휨모멘트 설계법을 그대로 적용되어야 하는지 등에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 2주형교에 적용되는 장지간 바닥판의 경우 바닥판의 두께 및 자중 감소를 위해 현장 타설 RC보다는 교축직각방향으로 프리스트레스를 도입한 PSC 바닥판이 보다 효과적인 대안으로 될 수 있다. 또한, 바닥판을 프리캐스트화 함으로서 초기 건조수축 균열을 저감시켜 바닥판의 내하력 및 내구성을 향상시키고, 거푸집 설치가 어려운 2주형교의 시공성도 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 교통량이 많은 도심부 시공 시 통행 제한을 최대한 단축시켜 시공을 가능한 한 신속히 수행하는 것이 가능하고, 고공 시공시 시공성 및 안전성 측면에서 우수하다. 본 연구에서는 장지간 바닥판의 실용화의 일환으로 바닥판 두께, 지간 등을 변수로 정적 및 피로실험을 수행하여 지간증대에 따른 바닥판의 파괴모드의 변화 및 장지간 바닥판의 피로저항성 등을 검토하였다.

### 1.1 시험체의 설계

본 연구에서는 프리스트레스트 프리캐스트 장지간 바닥판의 실험모델을 제작하여 바닥판 지간과 두께를 주요 변수로 정적 및 피로 실험을 수행하였다. 바닥판 두께와 지간을 실험 변수로 총 6개의 시험체를 제작하여 각 시험체의 균열하중과 균열상황, 균열특성, 파괴형태 및 극한강도 등을 검토하였다.

\* 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사수료  
\*\* 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수  
\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구소 책임연구원, 공학박사  
\*\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원  
\*\*\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구소 주임연구원, 공학박사  
\*\*\*\*\* 한국도로공사 책임연구원, 공학박사

실제 크기의 바닥판 실험은 실험 여건 및 운반 등으로 불가능하고 바닥판에서 교축방향으로 최대 휨 모멘트가 발생하는 범위는 2m~4m 정도인 것으로 유한요소해석의 결과 확인되었으므로 교축방향 바닥판의 길이는 2m로 결정하였다. 실험부재의 교축방향 연속성을 고려하기 위해서 교축방향 양 자유변에 H형강으로 강성보강하였다. 즉 대상교량 전체와 강성보강을 한 실험부재에 대한 유한요소모델을 구성해 H형강의 강성을 변수로 하여 반복해석을 수행하여 전체 모델과 실험부재의 교축방향 모멘트가 같아지도록 H형강의 강성을 결정하였다. 최종적으로 두 해석모델에서의 교축방향 모멘트를 비교한 결과, 약간의 차이는 보이나 그 오차가 10% 이내로 나타났다. 처짐분포는 거의 유사한 거동을 보였다.

본 연구에서는 지간변화에 따른 장지간 바닥판의 거동 이외에도 장지간 바닥판의 최소두께 감소 방안을 평가하기 위한 실험적 연구도 병행하였다. 이를 위해서 현행 도로교 설계기준에 의한 최소 두께를 갖는 바닥판과 설계하중에 의해 바닥판에 작용하는 압축응력이 콘크리트의 허용압축응력에 도달할 때까지 두께를 감소시킨 실험부재를 제작하였다. 각각의 바닥판은 콘크리트의 휨인장도를  $1.5\sqrt{f_{ck}}$ 로 보고 콘크리트에 인장응력은 발생하나 휨인장강도는 초과하지 않도록 포스트텐션 방식으로 PS 강선의 배근량과 긴장력을 결정하였다. 시방서에서 규정하는 최소두께보다 두께를 감소시킨 경우 전체 교량모델과 실험부재에 대해서 해석한 결과를 토대로 모멘트와 처짐을 비교하면 표 1과 같다.

표 1 바닥판 두께 변화에 따른 해석적 검토(모멘트 및 처짐 비교)

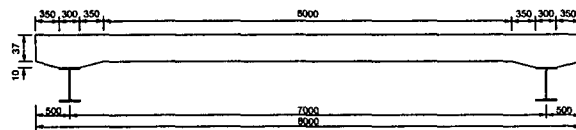
지간	구분	모멘트(kgf.cm/cm)			처짐 (mm)		
		전체 교량모델	실험부재	비율(%)	전체 교량모델	실험부재	비율(%)
5.5m (t=28)	교축방향	2,807	2,697	96.1	1.39	1.42	102
	교축직각방향	3,971	4,126	103.9			
7.0m (t=33)	교축방향	3,017	2,779	92.1	1.59	1.67	105
	교축직각방향	4,568	4,633	101.4			

1.2 실험부재의 제작

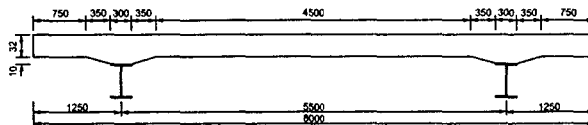
실험부재는 바닥판의 지간과 두께를 변수로 하여 4가지 종류, 총 6개의 시험부재를 제작하였다. 바닥판의 두께 32, 37cm는 현행 도로교 설계기준에 의한 최소 두께이고 두께 28, 33cm는 바닥판에 작용하는 프리스트레스와 하중에 의한 응력이 콘크리트의 허용압축응력에 도달할 때까지 두께를 감소시킨 것이다(표 2). 교축직각방향으로 프리스트레스를 도입하기 위한 PS 강재는 폴리에틸렌으로 코팅된 KS D 7002의 7연선 B종 SWPC 7B를 사용하였다. 프리캐스트 장지간 바닥판 실험부재의 단면형상은 그림 1과 같다.

표 2 실험부재의 주요 특성

부재	두께 (cm)	콘크리트 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	도로교 설계기준에 의한 최소 두께와의 비 (%)
지간 5.5m	32	400	100
	28		87
지간 7.0m	37	400	100
	33		89



(a) 주형간 거리 : 7.0m



(b) 주형간 거리 : 5.5m

그림 1 실험부재의 단면형상

## 2. 실험방법 및 측정내용

정적실험에서는 바닥판의 지간이 증가함에 따른 바닥판의 파괴형태를 고찰하였으며, 피로실험에서는 장지간 바닥판 두께 변화에 따른 피로파괴 거동, 피로저항성을 평가하였다. 또한, 교축 방향으로 실제 교량 바닥판의 연속체 효과를 주기 위해 실험부재에 설치한 강성체 보강의 유무에 대한 정적실험을 통해 실험부재의 타당성을 확인하였다.

바닥판에 도입된 압축응력 추정 및 하중 단계 별 휨응력 및 분배율 등의 바닥판 거동 분석을 위해 철근 및 콘크리트 게이지를 부착하였다. 제작된 총 6개의 실험부재에 대해서 정적 및 피로실험을 수행하였으며(그림 2), 제작된 실험부재의 구조적 특징 및 실험내용은 표 3과 같다.

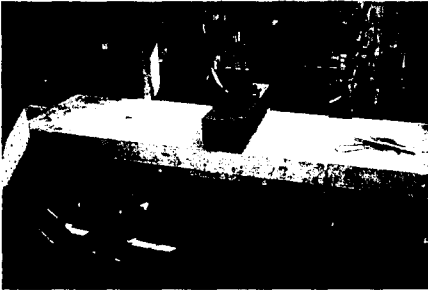


그림 2 실험장면

표 3 실험부재별 주요 특성 및 실험내용

시험체 명칭	지간 (m)	두께 (cm)	강성보강유무	실험내용	
M1T32-NR	5.5	32	비보강	정적실험	
M1T32	5.5	32	보강	정적실험	
M1T28	5.5	28	보강	정적실험	
M2T33	7.0	33	보강	피로실험	최소하중 2ton
					최대하중 32ton
M2T37-1	7.0	37	보강	피로실험	최소하중 4ton
					최대하중 39ton
M2T37-2	7.0	37	보강	정적실험	

## 3. 정적 재하실험 결과

### 3.1 중앙부 하중-처짐 특성

지간이 5.5m인 실험부재 하면의 중앙부에서의 하중-처짐 곡선을 그림 3에 나타내었다. 바닥판의 교축방향 연속성을 고려하는 강성보강을 하지 않은 경우는 강성 및 내력이 강성보강을 한 경우에 비해서 크게 저하되며, 또한 바닥판 두께를 감소시키는 경우보다도 강성보강 유무가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 운하중과 같이 집중하중을 받는 판은 하중 분배가 집중하중 부근에서 국부적으로 이루어지기 때문에 2방향성이 강해진다. 따라서, 2방향성 거동이 강한 집중하중을 받는 장지간 바닥판의 경우 교축방향 연속성을 고려하는 강성보강이 반드시 필요한 것으로 판단된다. 강성 보강을 한 시험체는 판 거동 양상을 보여 최대하중에서 급격하게 파괴된 반면, 강성 보강을 하지 않은 시험체는 단순보의 경우와 같이 휨파괴 양상을 보였다. 이로 미루어 보아 강성 보강을 하는 경우 2방향 거동 특성이 강한 장지간 바닥판의 판 거동을 보다 잘 표현할 수 있는 것으로 판단된다. 반면에 강성 보강을 하지 않은 경우, 인장철근이 항복한 후에도 매우 큰 연성이 나타나고 있는데, 이는 긴장재의 영향 때문인 것으로 생각된다.

도로교시방서의 최소두께 규정을 적용한 장지간 바닥판 지간의 변화에 따른 처짐측정 결과를 그림 4에 비교하였다. 지간이 7.0m인 부재(M2T37-2)는 균열 발생 후에도 강성의 변화가 크지 않고, 상대적으로 연성이 거의 없는 취성파괴 거동을 보인 반면에 지간이 5.5m인 부재(M1T32)는 강성변화도 크고 연성거동을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 거동의 차이는 바닥판의 지간이 길어지면서 증가되는 바닥판 두께의 영향이 큰 것으로 판단된다.

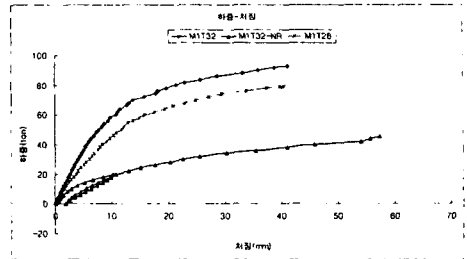


그림 3 지간 5.5m의 하중-처짐 곡선

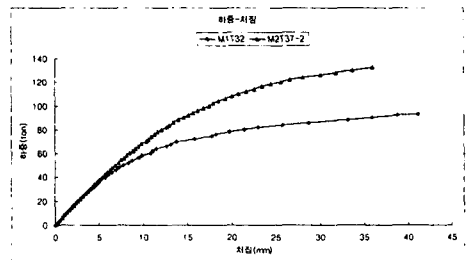
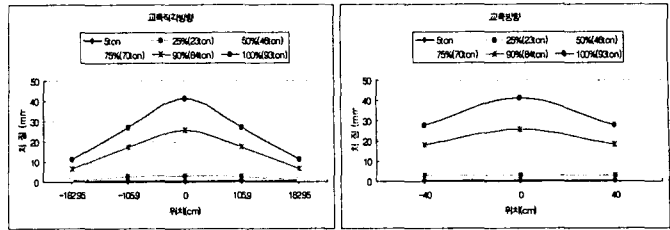


그림 4 지간 별 하중-처짐 곡선

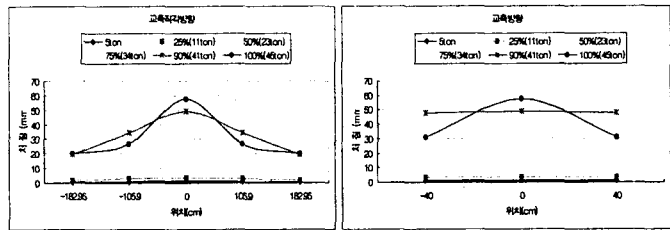
### 3.2 하중 단계별 처짐 특성

그림 5는 MIT32와 MIT32-NR 시험체에서의 하중 단계별 처짐 분포를 나타낸 것이다. 하중이 증가하면서 교축직각방향이 교축방향보다 곡률이 크게 나타나는데, 이는 휨모멘트를 교축직각방향에서 더 많이 부담하고 있음을 의미한다.

교축방향 연속성이 고려되지 않은 MIT32-NR의 교축방향은 곡률이 거의 없는 반면 강성보강을 한 MIT32는 하중이 커짐에 따라 곡률이 증가하면서 보거동에서 교축방향으로 휨모멘트가 분배되는 판 거동 특성을 보임을 알 수 있다. 또한, MIT32-NR은 하중이 최대하중에 도달할 때 바닥판 단부 근처의 처짐이 오히려 작아지는 현상이 나타나는데, 이것은 최대하중에 도달하기 전에 이미 부재로서의 저항력이 상실되어 하중 재하 부분에서 하중이 제대로 분배되지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 바닥판의 지간 길이가 일정 크기 이상이 되는 장지간 바닥판에서는 지간길이 변화에 관계없이 2방향 거동특성이 강한 판 거동을 보이는 것으로 나타났다.



(a) MIT32



(b) MIT32-NR

그림 5 각 방향에서의 하중단계별 처짐 곡선

### 3.3 콘크리트 및 철근의 변형률 특성

실험부재의 콘크리트 변형률을 측정하여 하중 단계별 휨 응력의 분배효과를 평가하였다. 초기하중에 의한 휨 응력 분배율을 유추하기 위해 동일 하중 (3ton)에서의 각 부재 하면의 위치에 따른 콘크리트의 교축직각방향 및 교축방향 변형률 분포를 그림 6에 나타내어 비교하였다. 부재 중앙부분의 교축직각방향과 교축방향 변형률 비는 MIT28에서 약 30.3%, MIT32에서 31.8%와 M2T37-2에서 39.1% 정도이지만 MIT32-NR에서는 5.9% 정도로 교축방향의 변형률이 상당히 작은 것으로 나타났다. 이는 강성 보강을 한 시험체는 초기하중단계부터 응력이 분배되는 판 거동 양상을 보이지만 강성 보강을 하지 않은 시험체는 교축직각방향에서 대부분의 하중을 부담하는 보 거동 특성을 보이기 때문이다. 각 시험체 하단의 중앙 위치에서 주철근과 배력 철근의 변형률은 MIT32-NR은 교축직각방향에서 하중의 대부분을 부담하기 때문에 배력철근의 하중 부담이 거의 없지만, 강성 보강을 한 시험체는 2방향 판 거동을 보여 교축방향으로 어느 정도의 하중 분배가 이루어지는 것으로 나타났다. 초기의 하중 범위에서는 주철근의 하중 부담이 약간 크지만, 교축직각방향으로의 균열이 먼저 발생하여 교축직각방향 균열이 지배적이 되어 하중이 증가하면서 배력 철근의 하중 부담이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 장지간 바닥판의 배력철근 설계시에는 현행 시방규정에 대한 이론 및 실험적 검증을 통해서 교축방향으로의 모멘트 분배효과를 보다 엄밀히 평가

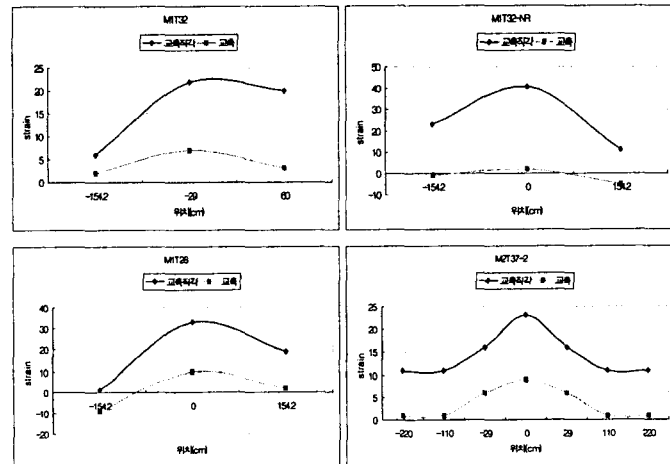


그림 6 위치별 콘크리트 변형률 곡선

하여 배력철근량을 산정하여야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 바닥판의 균열 및 파괴형상

정적실험이 수행된 각 실험부재의 바닥판 하부 균열분포를 그림 8에 나타내었다. MIT32, MIT28 및 M2T37-2는 바닥판의 중앙부에서 교축직각방향으로의 프리스트레스의 영향으로 인해 교축직각방향의 균열이 먼저 발생한 후에 하중이 증가하면서 교축방향으로의 균열과 새로운 균열이 진전되었다. 판 거동 특성에 의한 교축방향으로의 모멘트 분배로 교축직각방향 균열이 지배적인 것으로 나타났는데, 이로 미루어 주형간 거리가 증가하는 장지간 바닥판에서는 배력철근의 설계에 대하여 보다 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

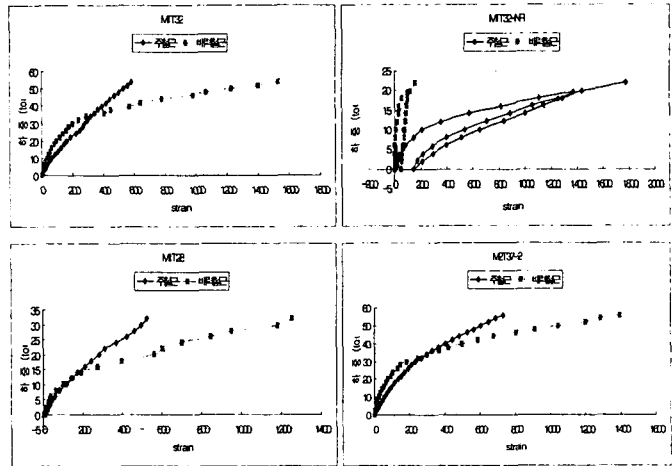


그림 7 지간 중앙에서의 각 부재별 철근 변형률 곡선

하중이 파괴하중에 근접해 질 때 바닥판의 측면 균열 양상이 수직균열에서 지점 쪽으로 대각선 균열로 발전하는 양상을 보이는데 이는 강성 보강을 위해 바닥판과 강성 빔을 연결한 강봉에 축력이 과대해 지면서 강봉이 어느 정도의 지점 역할을 하기 때문으로 생각된다. 또한, 하중이 파괴하중에 도달할 때 바닥판 상면은 재하면이 함몰하는 양상을 나타내었다.

MIT32-NR은 보 거동 특성에 의해 교축방향으로의 모멘트 분배가 되지 않아 대부분의 하중을 교축직각방향에서 부담하는 전형적인 휨파괴 양상을 보였다.

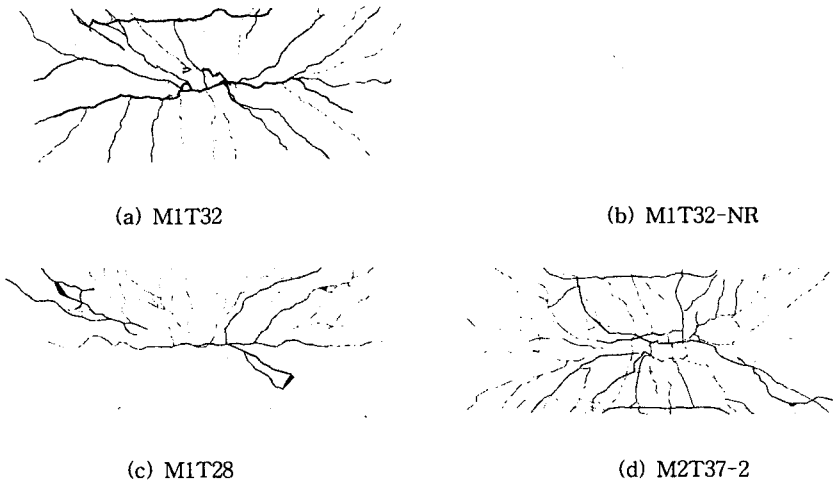


그림 8 바닥판 균열 분포

## 4. 피로실험 결과

반복하중에 대한 프리캐스트 장지간 바닥판의 피로강도를 구하기 위해 피로실험을 수행하였다. 피로하중에 대한 실험은 바닥판의 지간이 7.0m인 실험부재에 대해서 수행되었다. 바닥판 지간과 두께를 변수로 하는 피로실험이 수행된 각 실험부재의 기호는 (1) M2T37-1 : 바닥판 지간 L=7.0m, 두께 t=37cm, 강성 보강, (2) M2T33 : 바닥판 지간 L=7.0m, 두께 t=33cm, 강성 보강이다. 지간이 7.0m이고

도로교 설계기준에 의한 바닥판의 최소두께식을 적용한 두께  $t=37\text{cm}$ 의 M2T37-1인 경우, 200만회까지는 최소하중 2ton, 최대하중을 32ton으로 하여 2Hz의 속도로 반복재하하였으며, 그 이후로 267만회까지는 최대하중을 45ton으로 하여 피로실험을 수행하였다. 그림 9는 M2T37-1의 200만회 피로실험까지의 하중 반복회수 증가에 따라 시간 중앙에서 측정된 하중-처짐 곡선이다. 반복회수 증가에 따라 잔류처짐의 양은 조금씩 증가하지만 처짐 양상은 선형에 가까운 거동을 보임을 알 수 있다. 200만회 피로실험 후 처짐이 약 23% 증가했지만 하중-처짐 곡선의 기울기가 비슷하므로 강성의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

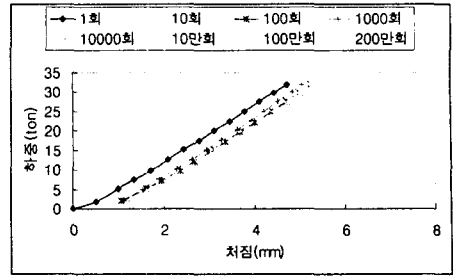


그림 9 M2T37-1의 하중-처짐 곡선

200만회까지의 반복횟수에 따른 최대하중 32ton 일 때 바닥판 중앙 하부의 주철근과 배력철근의 변형률 변화를 <그림 10>에 나타내었다. 주철근의 변형률변화는 크지 않으나 배력철근의 변형률은 반복횟수에 따라 증가하여 10만회 이후부터는 주철근 보다 배력철근의 변형률이 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 교축직각방향으로의 초기 균열이 2방향성에 의한 교축방향으로의 하중 분배에 의해 계속 발전하지만 2방향 거동을 고려하지 않고 배력철근량의 부족으로 인해 교축방향 단면의 응력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

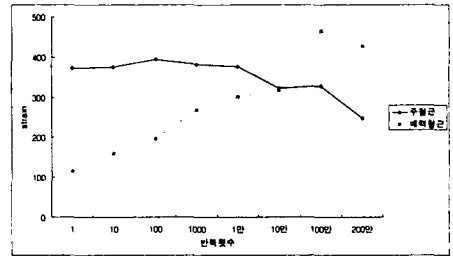


그림 10 반복횟수별 철근 변형률

## 5. 결 론

본 연구에서는 2주형교에 적용하기 위한 프리캐스트 장지간 바닥판을 제작하여 정적 및 피로하중 하에서의 거동특성 평가를 위한 실험을 수행하였다.

강성보강을 한 시험체는 교축직각방향의 프리스트레스와 교축방향으로의 하중 분배로 인해 교축직각방향의 균열이 먼저 발생하고 이 균열이 지배적인 균열이 되어 휨과피에 가까운 파괴거동을 보였다. M2T37-1의 200만회 피로실험까지의 처짐은 선형적인 거동을 보였으며 하중-처짐 곡선의 기울기가 거의 변하지 않았다. 따라서 장지간 바닥판은 사용하중 하에서 충분한 내구성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

판 거동 특성을 보이는 시험체에서, 바닥판 지간이 길어지면 판의 2방향성이 증가하여 교축방향으로의 하중 분배율이 증가됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 장지간 바닥판의 배력철근 설계시에는 주철근의 설계와 마찬가지로 교축방향의 모멘트를 고려하여 배력철근량을 산정하는 것이 보다 합리적인 설계방법이라 판단된다.

## 참고문헌

1. 신형식 강합성형 교량 개발에 관한 연구, 한국도로공사, 2001.
2. 대우건설, "프리캐스트 콘크리트 교량바닥판의 개발 및 실용화, 건설교통부, 2000.
3. 정철현, 김영진, 윤석구, "중차량 통행을 받는 도로교 바닥판의 피로수명평가", 대한토목 학회논문집, 제18권, 제5호, 1998, 9.
4. 坂井 藤一, 八部 順一, 大垣 賀津雄, 作川 孝一, 伊藤 敦, 竹内 清, 友田 富雄, "少主桁橋梁 用PC床版 に関する實驗研究", 川崎重工技報, 128号, 1996.
5. (財)高速道路調査會 : 橋梁の單純化に関する調査檢討報告書, pp. 95~119, 1993.
6. 주봉철, 김병석, 김영진, 박성용, 이정우, 신호상, "합리화 2주형교용 바닥판의 개발을 위한 실험 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 2001. 5
7. 도로교설계기준, 건설교통부, 2000