프리캐스트 바닥판용 클램프 조인트의 피로내구성

Fatigue Durability of Cramp Joint at Precast Highway Deck Slabs

김 윤 칠*

Kim, Yoon Chil

Abstract

The fatigue durability test using the actual size beam was performed with a cramp joint in order to apply to the highway bridge deck slab. Three types of beam were investigated for durability performance by considering stress conditions in real bridge deck slabs, 1) A beam with major shear force applied at the joint (RC Type) 2) A beam with major bending moments applied at the joint (PSC Type) 3) A beam with the pure shear applied at the joint. The experiment for beams with cramp joints showed that the cramp joint had enough durability for fatigue regardless of the overlaid length of the looped distribution bars under the current design strength level. Moreover, it was clarified that the enough durability for fatigue under the load repetition was achieved by increasing the joint span grater than 1.5D with the consideration of the deformation due to reduction in joint stiffness.

요 지

클램프 조인트를 이용하여 도로교 바닥판에 적용하기 위하여 실물 크기의 보 공시체를 이용하여 피로 내구성 실험을 수행 하였다. 실제 바닥판에서 발생하는 응력 상태를 가정하여 조인트 부에 주로 전단력이 작용하는 공시체(RC Type), 휨모멘트가 주로 작용하는 공시체(PSC Type), 순전단 타입공시체 3종류에 대해서 내구성 평가를 실시하였다. 클램프 조인트의 보 공시체에 대한 휨/전단 피로 실험의 결과 현행 설계 하중 레벨에서는 클램프 조인트는 루프 철근의 겹침길이에 상관없이 충분한 피로 내구성을 가지고 있다. 또한, 반복하중에 의한 피로 내구성 실험에 있어서도 조인트부의 강성 저하에 의한 변형을 고려하여 조인트 폭은 1.5D 이상으로 하면 충분한내구성이 있다는 결과를 얻었다.

Keywords : Cramp joint, Fatigue durability, Field joint, Pre-cast slabs

핵심 용어 : 클램프 조인트, 피로 내구성, 현장 조인트, 프리캐스트 바닥판

* 정회원, 경주대학교 건축학부 조교수

E-mail : yckim21c@kju.ac.kr 054-770-5322

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근, 도로교 시공에 있어서 건설비용의 절감과 현장작업의 간소화, 교량구조의 합리화 등의 관점으로부터 프리캐스트 바닥판(이하, "PC 바닥판")의 사용이 증가하고 있다. 특히, 2주형교 또는 소수주형교의 연구가 활발해 지면서 내구성이 뛰어난 다양한 PC 바닥판의 개발과 PC바닥판의 사용이 증가하고 있다.[6] 그러나, PC 바닥판을 이용하여 시공할 경우에는 수송·가설시의 중량이나 치수 등의 제한으로 교축방향으로 PC 바닥판을 접합하여 연속화 하는 현장 조인트가 반드시 필요하다. 현재 서해대교를 비롯하여 가장 활발히 사용되고 있는 공법으로써는 Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같은 RC루프 조인트가 가장 많이 사용되고 있다. 그러나, RC루프 조인트의 루프 철근 내부에 배치되는 주철근의 현장 삽입이 곤란할 뿐만 아니라 PC 바닥판을 설치할 때, 서로 인접하는 PC 바닥판으로부터 배근 되어있는 루프 철근과 거푸집 역할을 하는 돌출부에 의해 시공상에 간섭을 받기 쉽다. 또, 크래인을 이용하여 바로 수직으로 가설하기는 실질적으로 불가능하고, 주형 위에는 전단연결재의 용접으로 간소화 시공에 제한을 받고 있는 등 몇 가지 해결하여야 할 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 시공상의 문제점을 보완하여 현장에서 크래인 등 소형의 장비를 이용하여 수직으로 PC 바닥판의 시공이 가능하게 PC 바닥판 및 현장 조인트 공법으로써 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같은 조인트 구조를 고안하여 현장 시공을 용이하게 하였다. 본 조인트는 갈고리형상의 특수한 클램프를 이용하여 루프 철근과 루프 철근 외측에 배치된 주철근을 연결하여 철근간의 인터록(Interlock) 작용으로 배력철근 방향의 휨 모멘트와 전단력을 전달시키는 구조이다. 또한 이번 개발에 관련한 시험에서는 조인트부 콘크리트량을 최소화 하기 위해 클램프 조인트의 루프철근 겹침이음길이를 일반적인 루프 조인트 240mm (DIN1045의 규정치,[7] D를 상하 철근 간격으로 한다면 2D에 해당 됨)에 대해서 1.5D, 1.0D와 같이 짧은 폭을 변수로 하였다. 또한, 바닥판 하면의 거푸집 역활을 하는 돌출부를 한쪽 면에서만 제작하여 실제 시공 시 PC 바닥판의 바로 윗쪽에서 수직으로 가설이 가능한 구조를 고려하였다.

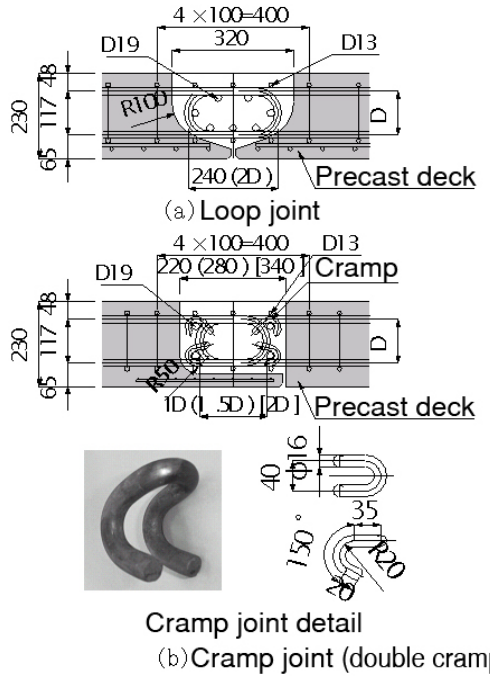

Fig. 1 클램프 조인트의 구조 및 상세

일반적으로 콘크리트 바닥판의 피로내구성을 확인하는 방법으로써는 오사카대학교의 Matsui 교수가 개발한 윤하중 주행 시험기에 의한 실물 크기 시험을 실시하는 것이 일본에서는 정례화되어 있고, 한국건설기술연구원에서도 최근 윤하중 주행 시험기의 개발로 피로실험이 활발히 진행되고 있다.[8] 그러나, 윤하중 주행 시험에 의한 피로 시험은 공시체 사이즈가 크고, 1개의 바닥판 시험에 장기간을 필요로 하며 많은 비용이 소요되기 때문에 다양한 파라미터를 고려한 시험에 의해 내하력 특성을 파악하기에는 경제적 또는 시간적으로 곤란하다. 또, PSC 바닥판과 같은 고 내구성 바닥판을 이용하여 윤하중 주행 시험을 실시해도 파괴까지의 재하는 사실상 곤란하고 실제의 내구성이나 파괴특성 등이 평가 되어 있지 않은 것이 현실이다.[1][5] 본 연구에서는 보 공시체를 이용하여 조인트부의 내구성을 확인하기 위해, 다양하게 가정한 일련의 실험 연구를 실시했다. 본문에서는 피로실험 결과에 대한 정리

와 RC루프 조인트와 비교하여 내구성 면에서의 실교적용가능성에 대한 검토를 도모하였다. 또한 본 내용의 결과는 참고문헌[6]의 데이터를 이용하여 보완하여 정리하였으며, PC 바닥판 조인트의 개발 연구 및 보수공법에 참고가 되기를 바란다.

2. 피로 시험

PC 바닥판 조인트 부분의 응력 상태를 고려할 때, 차량의 이동에 의한 휨 모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트 등이 동시에 복합적으로 작용한다고 생각된다. 여기에서는 전단력과 휨 모멘트에 주목하여 이것의 비율을 변수로 하여 아래 3가지 응력 상태를 가정하고 조인트부의 내구성을 확인하는 것으로 계획하였다.

① RC 바닥판이라 가정하고, 주로 전단력이 작용하는 타입(RC타입)
② PSC 바닥판이라 가정하고, 주로 휨 모멘트가 작용하는 타입(PSC타입)
③ 순전단 타입

2.1 시험 개요

본 시험에 이용한 공시체는 Fig. 2에 표시하였다. 바닥판 두께 230mm의 실물 크기 바닥판을 이용하였고, 배력 철근 방향으로 500mm 폭을 가정한 보 모델을 제작하였다. 철근의 배치는 조인트가 없는 부분에서의 휨 파괴보다 조인트가 있는 부분에서의 파괴 메커니즘을 파악하기 위한 연구이기 때문에 조인트부에서의 휨 파괴 및 전단 파괴가 선행하도록 휨 모멘트가 주로 작용하는 타입으로 선정하였다. Fig. 2 범례의 숫자는 PSC타입을, ( )부분의 숫자는 RC타입의 공시체 크기를 나타내었다. 또한 (a)는 3점 재하시공을 (b)는 순전단 시료공시체를 표시하였다.

공시체의 종류는 Table 1에 나타내었다. 클램프 조인트는 초기에 루프철근의 겹침길이를 1D로 했지만, 휨모멘트가 많이 작용하는 공시체 타입의 파괴 결과에서 조인트부의 회전 변형이 커지는 경향을 볼 수 있었기 때문에 이음길이를 1.5D, 2.0D로 변환하여 시험체를 추가하였다.

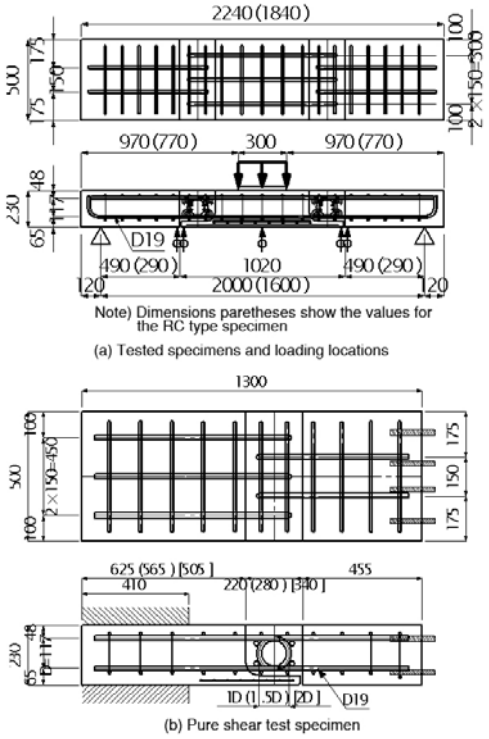

Fig. 2 실험 공시체

Table 1 시험 공시체 요약

		RC type	PSC type	Pure shear
Original test	Cramp 1.0D	A-1.0D	C-1.0D	E-1.0D
	Loop	B	D	F
Additional test	Cramp 1.5D	A-1.5D	C-1.5D	E-1.5D
	Cramp 2.0D	A-2.0D	C-2.0D	E-2.0D

모든 공시체의 재료 시험 결과를 Table 2에 나타내었다. RC타입·PSC타입의 재하는 Fig. 3에 표시한 재하 프레임을 이용하였다. 공시체의 지간 및 조인트 위치는 바닥판 두께가 230mm 되는 RC바닥판 및 PSC바닥판을 가정하고 PC 바닥판에 작용하는 최대 휨 모멘트와 최대 전단력을 FEM 해석으로 계산하여 보 공시체의 조인트 위치에 이 계산치와 등가의 단면력이 작용하도록 계획하였다. 또한, 순전단 타입의 재하장치는 Fig. 4에 나타냈듯이 내민보를 이용하여 내민보의 끝단부에 회전 변위를 구속하는 구조로 조인트부에는 전단력이 주로 작용하도록 하였다.

Table 2 재료 시험 결과

			Strength (N/mm^2)	Young's modulus (kN/mm^2)
Original test	concrete	Precast slab	f_{ck}=53	31.6
		Joint (expansive)	f_{ck}=49	27.5
	Reinforcement		f_y=380	194
Additional test	concrete	Precast slab	f_{ck}=48	32.1
		Joint (expansive)	f_{ck}=54	30.4
	Reinforcement		f_y=370	197

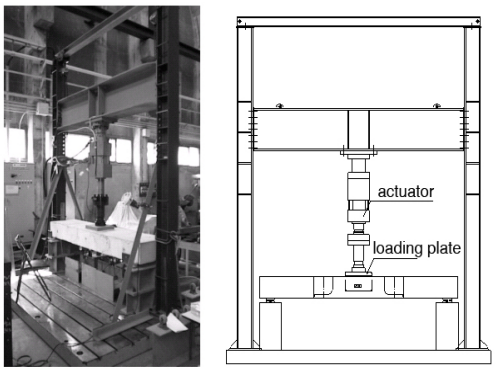

Fig. 3 피로 시험기 전경 및 개념도

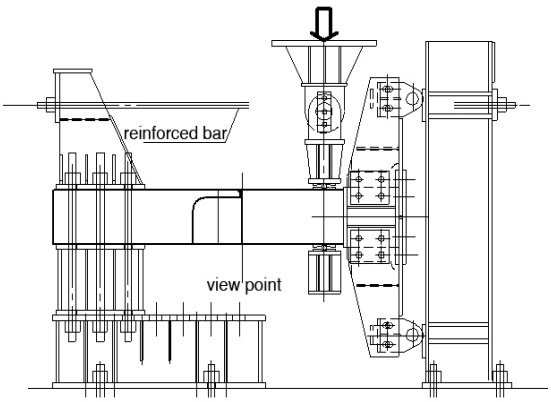

Fig. 4 순전단 시험기의 개념도

그리고, 실험관찰위치는 조인트부의 위치는 휨 모멘트가 0이 되는 위치에 배치하였다. 공시체의 설치 방향은 아래쪽으로 누르는 재하에 대해서 전단 강성이 낮다고 생각하여 상하역방향으로 공시체를 설치하였다.

재하하중과 회수는 RC타입·PSC타입 모두 실험관찰위치에서 철근의 응력이 허용 응력도가 되도록 설계하중 L을 기본 하중으로 하였다. 순전단 타입에서는 바닥판 두께가 230mm의 단순 판 이론으로 계산하여 실교 바닥판에 작용하는 최대 전단력의 계산값을 보공시체의 조인트 위치에서 발생하는 하중으로 가정하여 설계 하중 L로서 재하하였다. Table 3에 하중 진폭과 반복한 횟수를 표시하였다.

그러나, RC타입, PSC타입의 초기 시험에 있어서 재하하중을 1.5L로 올린 직후에 파괴되었기 때문에 추가 시험에서는 설계 하중 이후 10만회 마다 0.1배씩 하중을 증가시켰다. 또, 실험중의 측정은 변형, 처짐, 조인트부의 균열 폭, 균열 발생 양상 등을 측정하였다.

Table 3 하중 진폭과 반복 횟수

	Loading intensity		Number of cycles
RC Type	10kN ~ 78kN	〔DL(L)〕	0~500,000
	10kN ~118kN	〔DL(L)×1.5〕	500,000~
PSC Type	10kN ~ 49kN	〔DL(L)〕	0~100,000
	10kN ~ 74kN	〔DL(L)×1.5〕	100,000~
Pure shear type	10kN ~ 39kN	〔DL(L)〕	0~500,000
	10kN ~ 59kN	〔DL(L)×1.5〕	500,000~800,000
	10kN ~ 78kN	〔DL(L)×2.0〕	800,000~

2.2 시험 결과 및 고찰

Fig. 5은 실험에 의한 변형과 재하횟수의 관계를 나타내었다. Fig. 5(a)의 RC타입결과로부터 모든 공시체는 설계 하중 L에 대해서 50만회 재하까지 처짐 곡선은 안정되어 있어 처짐 값은 초기 시험보다 추가 시험의 공시체가 약간 작은 경향을 볼 수 있었다. 이것은 콘크리트 강도의 차이에 의한 것이라고 생각된다.

그리고, 50만회 이후의 설계 하중이상의 재하에 대해서는 A-2.0D 공시체에서는 1.4L 81만회의 재하에서 처짐이 갑자기 증가하여 파괴에 도달했다. A-1.5D 공시체에서는 1.5L 91만회 재하로 파괴되었다. 또, 1.5D와 2.0D 공시체에 있어서 1.3L까지의 각 재하 스텝 마다 처짐의 증가 곡선은 대부분의 공시체가 거의 비슷한 결과로 별다른 차이는 없었다.

Fig. 5(b)의 PSC타입의 공시체에서는 설계 하중 이하의 재하에서 루프 조인트의 D 공시체보다 클램프 조인트의 C-1.0D 공시체가 처짐이 작게 나타났다. 그러나, 설계 하중의 1.5배의 하중을 재하 하면C-1.0D에서는 재하 직후부터 처짐이 급격히 증가해 파괴에 이르렀다. 또한, 루프 조인트의 D공시체에서는 처짐은 증가 했지만 처짐값은 4.6mm정도로 55만회 정도까지 처짐값은 안정되었고, 그 후 파괴에 이르렀다. 이 차이는 조인트부에 휨 모멘트가 주로 작용하는 타입에서는 루프철근의 겹침이음길이를 1.0D로 했을 경우, 클램프에 의한 회전 구속 효과가 작고 조인트부의 열화 진전속도가 급속도로 진행되었기 때문이라고 추정된다. 한편, 루프철근의 겹침이음길이를 길게 한 C-1.5D 공시체에서는 하중이 증가함에 따라서 처짐은 증가하지만 설계 하중의 1.5배의 하중으로 45만회의 반복 재하까지 재하하여도 처짐의 증가 속도는 완만했다. C-2.0D 공시체에서는 설계 하중의 1.5배 13만회에서 파괴되었고, C-1.5D 공시체와 비교해도 적은 횟수에서 파괴하였다. 또, 처짐값도 C-1.5D 공시체보다 큰 값이 나타났다. 이 결과들은 C-2.0D 공시체에서는 설계 하중의 재하 회수를 50만회로 한 것과 공시체의 루프부분의 겹침이음길이를 길게 하여 지간의 중앙부분의 타설면에 있어서 휨 모멘트가 C-1.5D 공시체보다 커게 되기 때문이고, 이 부분에 시험 초기

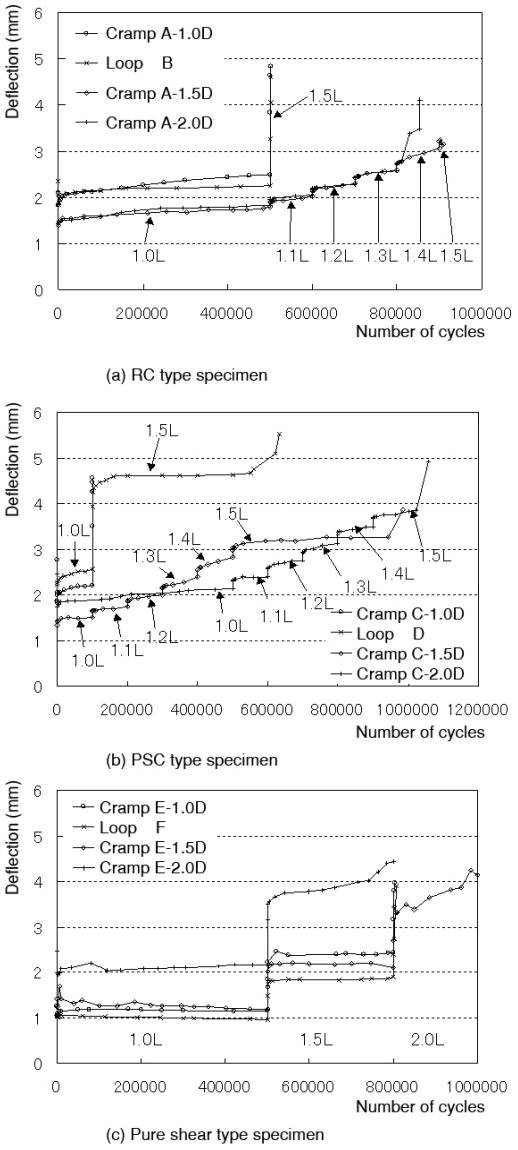

Fig. 5 각 하중 단계에 따른 처짐 변화

단계에서 균열이 발생 하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5(c)는 순전단 타입에 있어서의 처짐과 재하 횟수의 관계를 나타낸다. 이 결과로부터 모든 공시체의 1.5L 80만회의 재하에 대하여 처짐증가 경향은 완만한 것으로 순전단의 반복 피로에 대한 강성 저하는 작다는 것을 알 수 있었다.

그러나, 클램프 2.0D 공시체는 다른 공시체와 비교해 큰 처짐값을 나타내고 있다. 이것은 루프철근의 겹침이음길이가 길고 실험 관찰하는 위치와 다른 부분에 타설면이 있어 휨 모멘트가 다른 공시체보다 커져 이 부분에 균열이 발생했기 때문이라고 생각된다.

이상의 결과에서, 루프철근의 겹침 이음길이가 1.5D 이상의 클램프 조인트는 설계 하중의 1.5배의 반복 하중에 대해서도 루프 조인트와 비교하여 손색없는 조인트 성능을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6는 PSC타입 공시체의 각 재하횟수-처짐 분포를 나타낸다.

이 결과로부터 루프 조인트의 D공시체에 비하여 클램프 조인트의 C-1.0D 공시체가 처짐 곡선이 조인트 위치에서 꺾여진 형상을 보여준다. 이것은 조인트부의 타설면에서 초기 재하 단계에서 균열이 발생해 이 부분에서 보가 회전 변형하였기 때문이라고 생각된다. 한편, 루프철근의 겹침 이음길이를 길게 한 C-1.5D, C-2.0D 공시체에서는 처짐 곡선의 변동이 적고 반복 재하 시험 후에도 일정한 곡율의 처짐 곡선을 유지하는 것은 조인트부의 회전 변형이 작고, 반복 하중 재해에 대해서도 높은 조인트 강성을 유지하고 있다는 것을 말한다.

Fig. 7는 RC타입·PSC타입의 실험 종료시의 균열 상황을 나타내고 있다. 이 결과는 루프철근의 겹침 이음 길이에 관계없이 RC타입 공시체의 파괴 성상은 조인트부에 큰 경사 균열이 발생하고, 조인트부에 있어서는 전단 파괴의 패턴을 나타내고 있다고 말할 수 있다. PSC타입에서는 아래쪽으로부터의 수직 균열이 지배적이고, 조인트부에 있어서는 휨 파괴의 패턴이 지배적이다고 말할 수 있다. 또, PSC타입 공시체에 있어서 클램프 조인트의 모든 공시체는 수직인 타설면(조인트부)에 균열의 폭이 집중적으로 발생하여 거푸집 형상을 하고 있는 턱 내부 조인트부에는 거의 균열 폭이 생기지 않는데 비하여 루프 조인트에서는 양쪽의 타설면(조인트부)에서 균열이 발생하는 것이 확인되었다. 또, 순전단 타입의 공시체에서는 모든 공시체에서 2.0L의 하중 재하시에 실험 관찰하였던 조인트부가 아니라 휨 모멘트의 영향을 받는 내민보 지점부 또는 내민보 선단부의 모재(母材)에서 전단파괴 하였다.

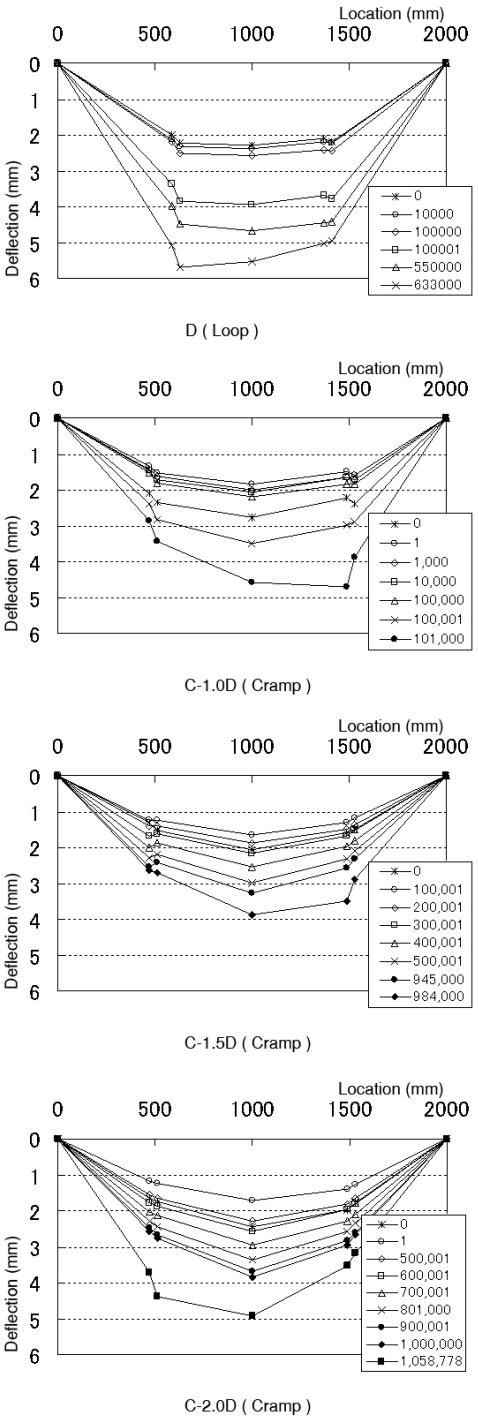

Fig. 6 각 하중 단계에서의 처짐 곡선

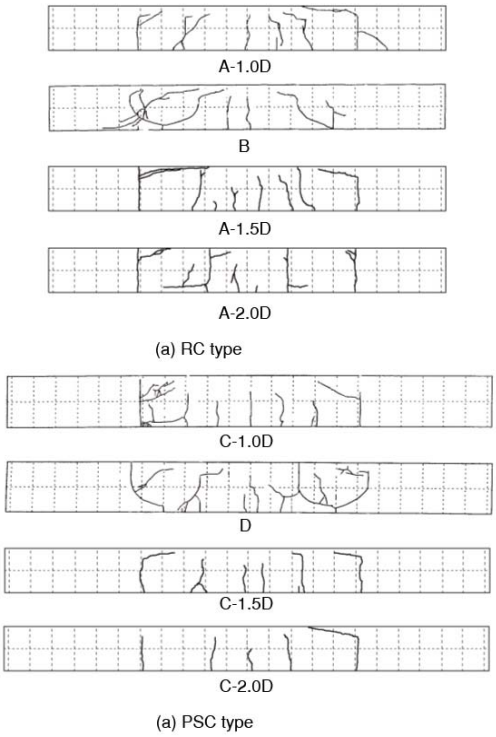

Fig. 7 최종 균열 발생 상황

이러한 결과를 종합하면 클램프 조인트와 루프 조인트 모두 순전단에 대해서는 충분한 내구성을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

이번 실험에서는 보 공시체에 의한 내구성의 확인 시험에 대한 결과를 나타내었지만, 향후 윤하중 주행 시험기에 의한 피로 시험을 실시해 이번 시험의 타당성 및 판으로써의 내구성을 검토할 예정이다.

3. 결 론

클램프 조인트의 보 공시체에 대한 휨·전단 피로 실험으로 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 현행의 설계 하중 레벨에서는 클램프 조인트는 루프철근의 겹침이음길이에 상관없이 충분한 피로내구성을 가지고 있다는 것을 알았다.
2) 클램프 조인트의 루프철근의 겹침이음길이를 1.0D로 작은 경우, 조인트부에서 강성이 저하하여 회전변형하는 경향이 보여지지만 루프철근의 겹침길이를 1.5D이상으로 한다면, 반복하중에 의한 피로내구성 시험에 있어서도 조인트부의 강성 저하에 의한 회전변형이 적기 때문에 충분한 내구성을 가지고 있다는 것을 알았다.

감사의 글

본 연구는 오사카대학교의 Matsui교수님의 지도와 사카이철강의 Kubo씨의 지원으로 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 류형근, 장승필 외, "루프이음 프리캐스트 바닥판의 휨실험", 콘크리트학회 논문집, 2003, pp. 518-523.
2. 대우건설, "프리캐스트 상판 및 접합부의 거동에 관한 연구", 최종보고서, 1996.
3. 대우건설, "프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 개발 및 실용화", '96연구개발사업 제2차년도 연차보고서', 1998.
4. Kim, Y.C., Matsui, S., Egashira, K., and Miyagawa, O., "Experimental Study on the Shear Strength of Shear Key Joints of Precast Slab", Proc. of 21th JCI annual coference, in Japanese, 1999, pp. 829-834.
5. JSCE, "General specifications of concrete, design", in Japanese, 1996.
6. Matsui, "Technology Development for Bridge Deck-Innovations on Durability and Construction -", J. of Bridge and Foundation Engineering, in Japanese Vol. 31, S., 1997, No. 8, pp. 84-94.
7. Kim, B.S., "Introduction of the first Wheel Running Machine in Korea and Research Projects on Slabs and Decks" Proc. of the 5th Japan-korea joint seminar on BMS, 2004.
-. Leonhardt, "鐵筋コンクリートの配筋", 鹿島出版會, 1985.
8. Kim, Y.C., "Study on Mechanical Characteristics and Fatigue Durability of Joint of Precast Decks", Ph.D Thesis, Osaka University, 2001.

(접수일자 : 2006년 6월 5일)