

프리플렉스형의 피로거동에 관한 실험적 고찰

An Experimental Studies on the Fatigue Behavior of Preflex Girder

장 동 일¹⁾ · 이 명 구²⁾ · 이 승 용³⁾
By CHANG, Dong Il Lee, Myeong Gu and LEE, Seung Yong

ABSTRACT : The studies are conducted to investigate the fatigue and fracture behavior of preflex girder. In this work, the fatigue tests using by constant amplitude fatigue loading and 4-point-loading to maintain pure bending condition in the mid-span of preflex girder will be performed. It is expected from the results of the studies to provide the fatigue strength and the S-N curve of preflex girders. In addition, it will be ensured that fracture initiation occurs in the welded part of horseshoe-type shear connector as well as in other welded joints.

1. 서 론

프리플렉스형(Preflex Girder)은 1949년 벨기에의 엔지니어인 A. Lipski가 고안하여 1952년 벨기에의 교량규준인 NBN5¹⁾에 채택된 후 실용화가 가속되어 발원지인 벨기에를 비롯하여 영국, 프랑스, 독일, 이태리, 일본 등에서 교량 및 건축 구조물에 널리 사용되고 있다.²⁾

프리플렉스형은 I형 단면을 갖는 강형에 프리플렉션(Preflexion)에 의한 휨변형을 준 상태에서 아래 플랜지 주위를 콘크리트로 완전히 피복한 후 프리플렉션 하중을 릴리스(Release)시켜 아래 플

랜지에 압축력을 도입시킨 것으로서, 바닥판 콘크리트를 타설하여 강형 전체를 콘크리트로 피복한 프리플렉스 합성형을 제작하기 전단계의 형식이다.³⁾

프리플렉스 합성형은 다른 구조형식에 비해 많은 장점을 갖고 있어 그 활용도가 대단히 크나, 설계 및 시공시의 문제점 발생에 따른 대책 마련의 미비로 조치사항이 속속 제시되고 있다. 지금까지 국내에서는 단지 프리플렉스 합성형의 시방서 제작을 위한 정적거동에 관한 연구를 통해 1987년도에 프리플렉스 합성형의 설계, 제작 및 시공을 위한 표준시방서⁴⁾의 작성에 이르렀으나, 현재 가설

1) 정회원 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
2) 정회원 : 서울보건전문대학 산업안전과 전임강사
3) 학생회원 : 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

되어 공용 중에 있는 프리플렉스형 교량에서 발생하는 피로균열과 피로수명 등의 전반적인 피로문제에 대한 연구 및 그에 기초한 피로규준의 설정, 피로사고 방지와 유지보수에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

AASHTO 시방서⁵⁾ 규정에서는 용접 구조상세가 18개 항목으로 분류되어 있으며, 이들 중 9개 항목이 프리플렉스 합성형의 설계에 적용되고 있으나, 국내에서는 설계시 피로를 고려하지 않고 있어 프리플렉스형에 대한 피로파괴 메카니즘, 실구조물을 모형화한 프리플렉스형의 피로파괴 거동에 대한 연구의 필요성은 대단히 크다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 아래 플랜지 콘크리트가 타설된 프리플렉스형 시험체를 제작하여 일정진폭 반복하중하에서 피로시험을 실시하여 피로하중의 누적에 따른 콘크리트 균열을 평가하고, 아래 플랜지 콘크리트의 허용 피로균열폭을 제시하였으며, 피로균열의 발생원과 성장에 대한 메카니즘을 규명하고, 피로강도를 추정하여 외국 시방기준과 비교, 분석하였다. 또한 프리플렉스 합성형의 피로에 대한 적합성을 판정하고, 파면해석을 통해 결함에서의 응력집중원을 규명하여 응력확대계수를 평가하였다.

2. 시 험

2.1 재료

프리플렉스형의 시험체 제작시 강재는 SWS

520을 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같고, 아래 플랜지의 전단 연결재는 SWS 400 강재를 사용하였다.

한편 아래 플랜지 콘크리트에 사용된 철근은 D16(주철근)과 D10(배력철근)이고, 콘크리트의 배합설계는 표 2와 같으며, 고강도를 요구하기 때문에 설계기준강도를 400kg/cm² 이상으로 하였다.

2.2 시험체

프리플렉스형 시험체의 제원은 피로시험기의 용량이 50tonf인 점을 고려하여 40tonf의 하중을 가했을 때 최대응력이 허용응력 부근에 오도록 설계하였으며, 이때 슷음량은 45mm, 그리고 지간의 1/4 지점에 31.35tonf의 프리플렉션 하중을 주었다. 이에 따라 결정된 시험체의 제원 및 형상은 그림 1과 같다.

2.3 시험방법

피로시험은 50tonf 용량의 일본 Shimadzu사 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 일정진폭하중하에서 4점 휨시험을 실시하였으며, 시험체의 설치 상황은 그림 2와 같다. 재하시 반복회수 10회까지는 정적하중하에서 실시하였으며, 그 이후는 응력비 R을 0.1로 하여 시험체 중앙 변위에 따라 0.5~1.0Hz의 속도로 재하하였다. 이때 각 시험체별 시험조건은 표 3과 같다.

표 1. 화학성분 및 물리적 성질

강재 종류	화학성분(%)					물리적 성질			
	C	Si	Mn	P	S	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)	신장률(%)
SWS 520	0.16	0.45	1.37	0.015	0.007	449.5	609.5	221289.8	25.0

표 2. 아래 플랜지 콘크리트의 배합설계표

굵은골재 최대치수(mm)	수렴프(cm)	공기량(%)	물시멘트비(%)	잔골재율(%)	단위량(kg/m ³)			
					물	시멘트	잔골재	굵은골재
25	12	4	32	35	163	510	597	1110

각 시험체별로 실시하였고, 그 후에는 반복회수 50000회 간격으로 실시하였다. 조사 결과로부터 각 시험체별 피로파괴가 일어날 때까지 반복회수와 최대하중하에서의 균열폭의 관계는 그림 4와 같다.

그림 4로부터 시험체 1은 전체 수명의 81%, 시험체 2는 68%, 시험체 3은 56%, 시험체 4는 87%까지 0.2mm 이하의 균열폭을 유지하다가 피로파괴되며, 따라서 균열폭이 0.2mm를 초과할 때는 응력진폭에 따라 56~87%의 피로수명이 소요됨을 알 수 있다. 이는 일반적인 콘크리트 구조물의 균열폭 허용치⁵⁾와 잘 일치하고 있어, 프리플렉스 합성형의 아래 플랜지 콘크리트의 피로 허용 균열

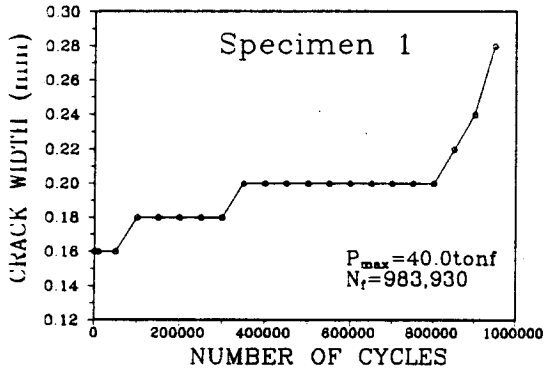
폭을 0.2mm로 하는 것은 타당하다고 사료된다.

각 시험체별 최대하중(P_{max})과 파단수명(N_f)에 대한 균열폭이 0.2mm의 반복회수(N_i)와 백분율 관계를 나타내면 그림 5와 같다.

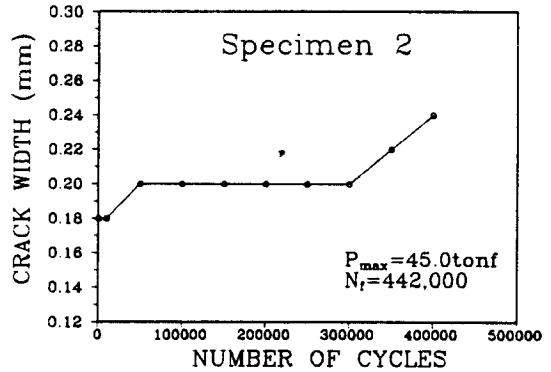
그림 5에서 P_{max} 와 N_i/N_f 의 관계를 회귀분석하면 식(1)이 얻어진다.

$$P_{max} = -0.3876\left(\frac{N_i}{N_f}\right) + 70.172 \quad (1)$$

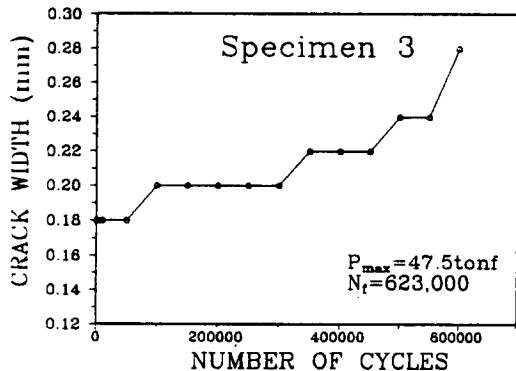
본 연구에서는 프리플렉스 합성형의 설계하중인 30tonf를 적용하면 피로수명 동안 허용 균열폭이 0.2mm를 넘지 않음을 알 수 있다.



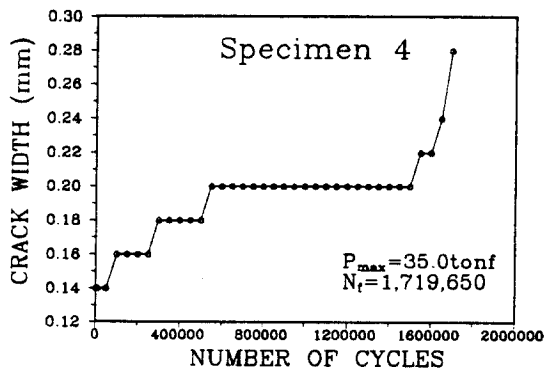
(a) 시험체 1



(b) 시험체 2



(c) 시험체 3



(d) 시험체 4

그림 4. 반복회수별 콘크리트의 최대 균열폭의 변화

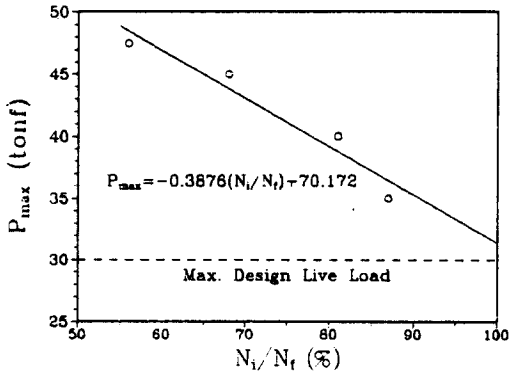


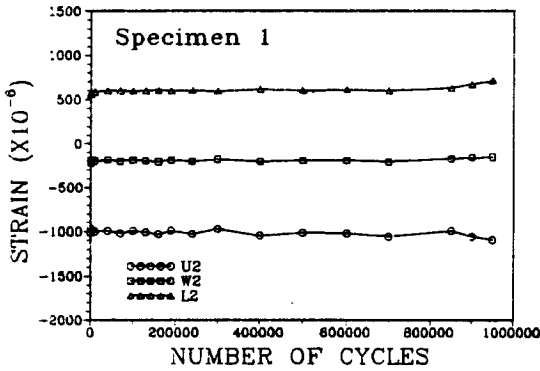
그림 5. 최대하중과 파단수명에 대한 균열폭이 0.2mm를 넘어서는 시점의 반복회수의 백분율과의 관계

3.2 반복회수별 변형률, 처짐의 변화

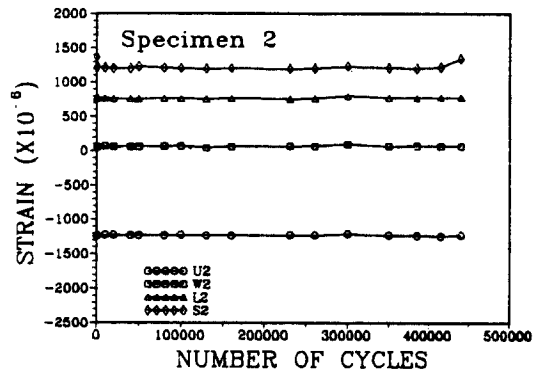
각 시험체별로 일정 반복회수 마다 20tonf 재하시와 최대하중 재하시, 각 부위별 변형률의 변화와 중앙부 처짐의 변화를 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6으로부터 각 시험체별로 변형률의 변화가 일정한 시점에서 변화하는 것을 알 수 있으며, 처짐에 있어서도 같은 양상이 나타난다. 각 시험체별로 변형률과 처짐의 변화시의 반복회수를 균열폭이 0.2mm를 초과하여 급변하는 시점과 함께 정리하면 표 4와 같다.

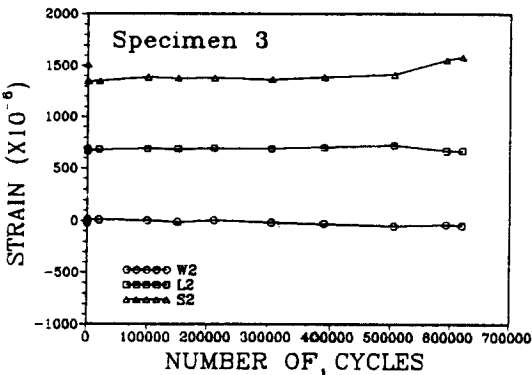
그림 6 및 표 4를 살펴보면, 반복회수가 증가함에 따라 프리플렉스형의 각 부위의 변형률과 중앙부의 처짐이 일정하게 유지되다 어느 시점에서 변



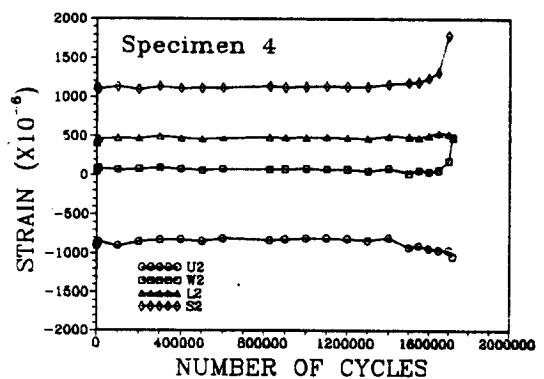
(a) 시험체 1



(b) 시험체 2



(c) 시험체 3



(d) 시험체 4

그림 6. 반복회수별 최대하중 재하시 변형률 및 처짐의 변화

표 4. 변형률, 처짐 및 균열폭의 변화시의 반복회수

시험체 번호	변화시의 반복회수		
	변형률	처짐	균열폭
1	850,000	850,000	850,000
2	415,000	385,000	350,000
3	505,000	505,000	500,000
4	1,550,000	1,500,000	1,555,000

화하고, 또한 이러한 시점이 균열폭 0.2mm를 장기간 유지하다가 변화하는 시점과 일치하는 점으로 미루어 이 시점에서 균열이 상당히 진전되어 복부판에 까지 도달한 것으로 사료되나, 변형률 혹은 처짐의 변화로 강형의 초기균열 발생시기를 추정하기에는 곤란하였다.

3.3 피로균열 발생 및 파괴 위치

프리플렉스형이 피로파괴된 후, 아래 플랜지 콘크리트를 파쇄하여 강형의 피로균열 발생부위를 조사한 결과, 그림 7 및 사진 1에서와 같이 최대 모멘트 발생부위에 있는 미끄럼 방지 말굽형 전단 연결재의 용접 연결부에서 피로균열이 발생하였음을 알 수 있다.

한편, 각 시험체의 파면사진인 사진 2를 살펴보면, 응력진폭을 변화시켜 도입된 Beach Mark가 선명히 나타나고 있으며, 이로부터 말굽형 전단 연결재에서 피로균열이 발생하여 타원 모양으로

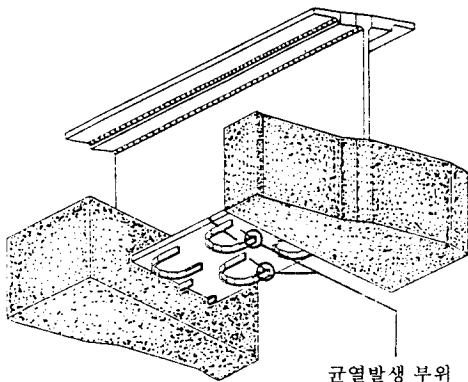


그림 7. 균열발생 부위

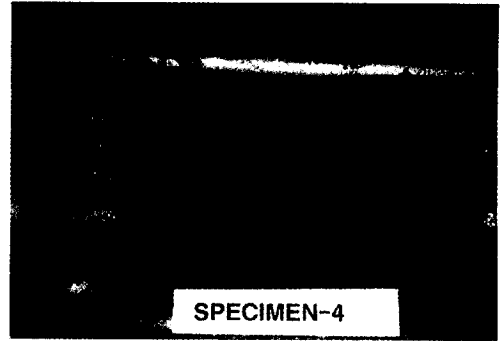


사진 1. 균열발생 사진

성장함을 알 수 있다.

따라서, 프리플렉스 강형에 있어 아래 플랜지에 전단 연결재의 용접성이 프리플렉스 합성형의 피로강도에 큰 영향이 끼치며, 용접에 세심한 주의로 용접성을 향상시키는 것이 프리플렉스 합성형의 피로수명 연장과 피로강도 향상에 주요한 요인이라고 사료된다.

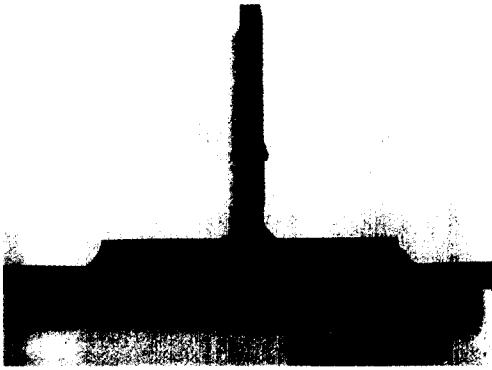
3.4 피로수명곡선(S-N 선도)

프리플렉스형의 피로시험 결과로부터 시험체별 응력범위와 파괴시 반복회수를 정리하여 표 5에 나타내었으며, 이로부터 피로수명곡선(S-N 선도)을 그림 8에 나타내었다.

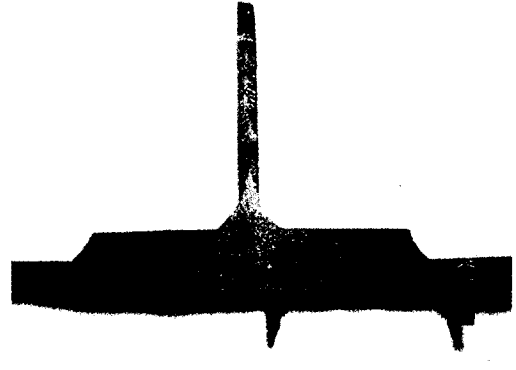
표 5. 피로시험 결과

시험체 번호	최대하중 P_{max} (tonf)	응력범위 $\Delta\sigma$ (MPa)	파괴시 반복회수 N_f
1	40.0	106.33	983,930
2	45.0	150.82	442,000
3	47.5	131.61	623,000
4	35.0	77.91	1,719,650

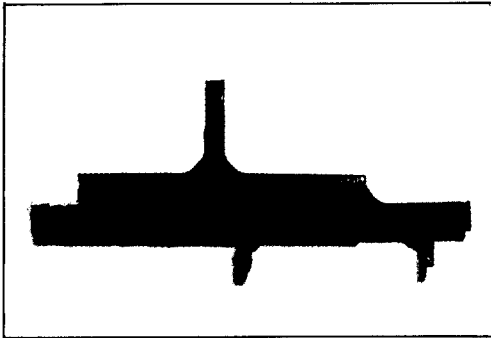
그림 8로부터 프리플렉스형의 피로강도는 AASHTO 시방서의 전단 연결재에 대한 피로등급인 C등급에 다소 미달함을 알 수 있으며, 위의 결과를 회귀분석하면 식(2)가 얻어지고, 하중반복회수 200만회에 대한 피로강도를 구하면 73.57MPa임을 알 수 있다.



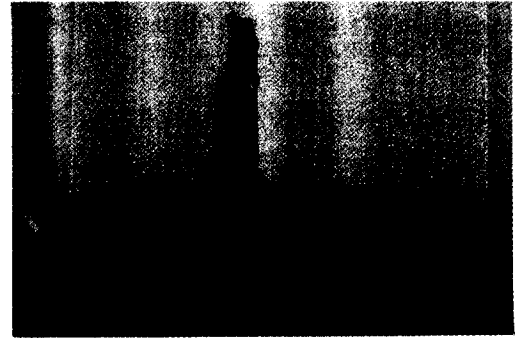
(a) 시험체 1



(b) 시험체 2



(c) 시험체 3



(d) 시험체 4

사진 2. 피로파면

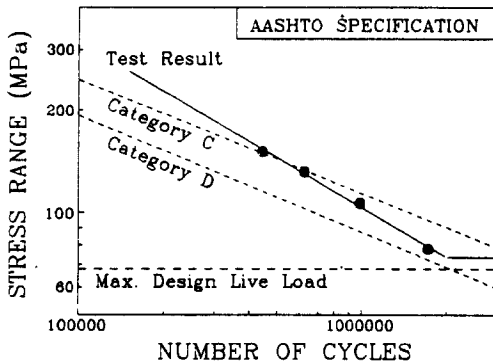


그림 8. 피로수명곡선(S-N 선도)

$$\Delta\sigma = 87253.2N^{-0.4879} \quad (2)$$

따라서, 프리플렉스 합성형의 설계시 최대 설계 활하중인 30.0tonf을 적용하면 모멘트 선도로부터

최대 모멘트가 37.5t · m로 되고, 최대응력을 계산하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{I}y = \frac{37.5t \cdot m}{62592.5cm^4} \times 12.9cm \\ &= 772.86kgf/cm^2 = 75.74MPa \end{aligned}$$

여기서, y는 중립축에서 강형 아래 플랜지까지의 거리이다.

식(3)에서 구한 최대응력에 본 실험에서 적용한 응력비 0.1을 고려하면 최대응력범위는 68.17MPa이고, 이를 그림 8에 나타낸 결과, 본 실험에서 구한 하중반복회수 200만회에 대한 피로강도가 최대 설계 활하중 응력을 초과함을 알 수 있다.

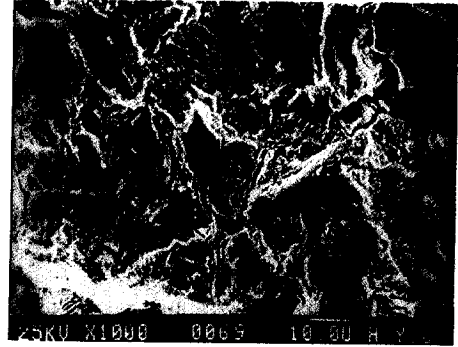
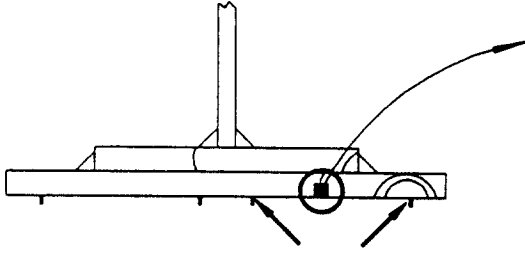


사진 3. 용접부 사이에 위치한 파면사진

3.5 파면해석

피로하중을 받은 시험체의 파면을 주사 전자현미경에 의해 고배율로 관찰하면 피로 줄무늬(Striation)로 알려진 성장띠가 관측된다. 이 줄무늬는 균열진전 방향과 직각으로 나타나고, Beach Mark와는 평행하다. 이때 줄무늬의 간격은 한 반복회수 동안에 진전하는 균열의 증가분을 의미하며, 응력범위와 함께 변화한다.⁷⁾

시험체 2의 두 곳의 전단 연결재 용접부 사이에 위치한 파면을 1000배 확대한 사진 3을 살펴보면, 줄무늬의 진행방향이 두 방향으로 나타나 있으며, 균열이 전단 연결재의 용접부 두 곳에서 발생하였음을 알 수 있다. 이와 같이 균열의 발생은 한 곳에서만 발생한 것은 아니며, 두 곳 이상에서 발생하여 피로수명을 단축하는 요인이 됨을 알 수 있다.

한편, 각 줄무늬는 각 부하 사이클이 지난 후의 균열 전선의 위치를 나타내고 있기 때문에 줄무늬 간격을 이용하여 파면상의 임의의 위치에서의 피로균열성장률을 측정할 수 있다.

Bate와 Clark⁶⁾은 피로균열의 성장속도를 나타내는 줄무늬 간격이 응력확대계수범위 ΔK 와 상관관계가 있음을 발견하고 식(4)와 같이 나타내었다.

$$\text{줄무늬 간격} \approx 6(\Delta K / E)^2 \quad (4)$$

여기서, ΔK 는 응력확대계수범위, E는 탄성계수이다.

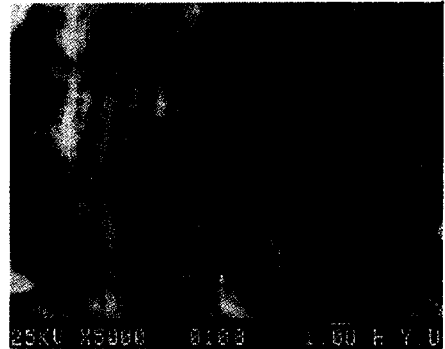
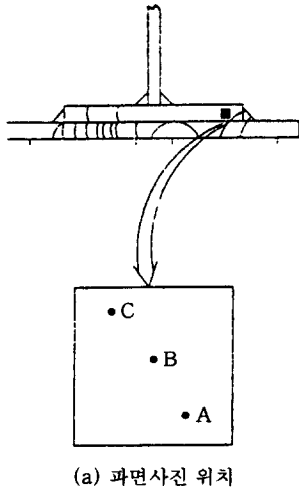
따라서, 시험체 1과 시험체 4의 파면을 주사 전자현미경 촬영을 실시하여 1회 반복회수 동안 균열이 성장한 줄무늬 간격을 측정하여 식(4)를 이용하여 응력확대계수범위를 구한 결과는 사진 4와 같다.

사진 4를 살펴보면, 균열발생 부위로부터 멀어질수록 줄무늬 간격이 넓어져 균열성장이 빨라지고 응력확대계수범위 ΔK 가 커짐을 알 수 있다. 한편 균열이 성장하여 복부판에 이르러서는 줄무늬는 나타나지 않고 취성파면에서 관찰되는 유사벽개 현상이 나타났다. 따라서 균열이 복부판에 이르면 피로파괴에서 취성파괴로의 파괴방식의 전이 발생을 알 수 있다.

4. 결 론

아래 플랜지 콘크리트를 타설한 프리플렉스형의 피로파괴 거동을 규명하기 위하여 일정진폭 하중하에서 피로시험을 실시한 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 프리플렉스형의 피로파괴는 말굽형 전단 연결재 용접부에서 발생하였으며, 이 부위에 대한 AASHTO 시방기준상의 범주 C 수준에 다소 미달하는 것으로 나타났다. 그러나, 최대 설계 활하중 응력에 대해 검토한 결과 피로설계 기준을 충



(da / dN=1.00 μm / cycle, $\Delta K=86.02\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

(b) A부분



(da / dN=1.71 μm / cycle, $\Delta K=112.48\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

(c) B부분



(da / dN=2.28 μm / cycle, $\Delta K=129.88\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

(d) C부분

사진 4. 시험체 4의 피로파면

분히 만족하며, 실제로 설계 활하중에 의한 발생 응력범위가 피로한계 응력범위 보다 작고 공용 중 활하중 통과시 실제 발생응력은 이보다 훨씬 작을 것이므로 프리플렉스형은 피로에 대해 충분한 인성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

(2) 프리플렉스형의 피로문제는 주부재인 프리플렉스형 자체보다는 전단 연결재의 용접이 문제가 되므로 프리플렉스형의 피로강도를 향상시키기 위해서는 전단 연결재의 용접에 세심한 주의를 하여 시공하여야 할 것이다.

(3) 프리플렉스형의 아래 플랜지 콘크리트의 균

열폭을 조사한 결과, 전체 피로수명의 약 80% 정도까지 0.2mm 이하의 균열폭을 유지하다가 피로 파괴에 도달함을 알 수 있으며, 이는 콘크리트 구조물에서 일반적인 균열폭 허용치와 일치하고, 설계하중하에서는 피로수명 동안 허용 균열폭을 초과하지 않는 것을 알 수 있다.

(4) 파면해석 결과, 피로균열이 말굽형 전단 연결재의 용접 부위에서 발생하고, 반복회수가 증가할 수록 줄간격은 넓어지고 균열성장이 빨라지며 응력확대계수범위 ΔK 가 커짐을 알 수 있다. 또한 균열이 성장되어 복부판 부근에 이르러서는 줄무

는 관찰되지 않고, 취성파면과 유사벽개의 모양이 나타남을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. NBN 5-4th edition, "Reglement pour la construction des ponts metalliques", Institut Belge de Normalisation, 1964.
2. L. Base & A. Lipski, "The preflex beam, principles and reports on completed experiments", Communication No. B. 39, International Congress on Prestressed Concrete, 1951.
3. 神谷良陳, 福代博志, "プレビ-ム合成げたの設計と問題點", 構造用設計資料 No. 46, 日本鐵道施設協會, 1976. 6.
4. 사단법인 대한토목학회, "프리플렉스 합성형 표준시방서 및 동해설(안)", 1987.
5. AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", pp. 109~113, 1986.
6. ACI committee 224R-90, "Control of cracking in concrete structures", American Concrete Institute, pp. 224R-19, 1990.
7. J. M. Barsom & S. T. Rolfe, "Fracture and fatigue control in structures", Prentice-Hall, pp. 242~248, 1987.
8. R. C. Bates & W. G. Clark, Jr. Trans. Quart. ASM, 62(2), 380, 1969.