

철도교용 IT거더의 피로특성

최 상 현(한국철도대학 교수)

이 창 수(서울시립대학교 교수)

Fatigue characteristics of the IT girder for railroad

Choi, Sang-hyun

Lee, Chang-soo

Abstract

In designing a railroad bridge, the fatigue is one of the main factors to be considered for ensuring safe operation. Especially, for a new type of a structural member, which has not been adopted to railroad bridges, the fatigue performance should be checked. In this paper, the fatigue characteristics of an IT girder are examined. The IT girder is a new type of a prestressed concrete girder which has two prestressed H-beams in the top of the girder to give the girder additional sectional capacity. To obtain the fatigue performance, a 10m IT girder specimen is designed, and a repeated load test is performed by applying the load cyclically two million times. The magnitude of the repeated load is determined considering the stress level under the service condition. During the test, static load tests are performed to identify the stiffness degradation. The fatigue performance of the girder is checked according to the Japanese and the CEB-FIB design codes. The fatigue test result shows that the IT girder satisfies both design codes.

[key word : IT girder, railroad bridge, fatigue, prestressing, repeated load]

I. 서론

RC 및 PSC 구조에서 피로에 의한 손상은 콘크리트, 철근, 강선 등의 구성 요소 또는 이러한 요소들의 조합의 형태로 발생할 수 있다. 따라서 효율적인 피로해석을 위해서는 개별적인 요소의 피로거동에 대한 해석이 필수적이며, 이들 요소가 서로 연관되어 있을 경우 피로거동의 해석은 더욱 복잡해질 수 있다. 작용 하중에 의하여 변위, 응력 등의 응답이 결정되고 설계기준 등 구조물의 안전성과 사용성을 반영하여 설정된 한계값과의 비교를 통하여 적절한 단면 및 부재를 선택하는 해석 및 설계 과정에 비하여, 피로해석의 경우 하중의 형태, 재하 순서, 상대적인 크기 등의 하중 특성에 따라 부재 및 구조물에 발생하는 응답이 상이하고, 동일한 하중 조건에서도 구조물의 기하학적, 재료적 특성에 따라 다른 거동을 보일 수 있어 항상 이러한 변수를 고려하여 검토하여야 한다(박준건, 2002).

철근, 강재 등의 금속재와 달리 콘크리트의 경우 일반적으로 피로 검토의 중요성이 간과되어 오고 있는 현실이나, 실제 콘크리트 구조물에 있어서도 환경적 요인 등에 따른 시간의존적 열화가 심각한 성능저하로 연결되면서 반복하중에 의한 피로파괴 위험성이 대두되고 있는 상황이다(박준건, 2002). 실제 백만 번의 반복횟수에 대한 콘크리트의 압축, 인장, 휨 피로강도는 정적강도의 대략 55%로 알려져 있다(한국도로공사, 1997). 특히 도로교와 달리 철도교는 궤도라는 고정된 경로를 통하여 주기성이 강한 하중이 반복적으로 작용하며, 활하중의 비율이 높아 피로에 대한 검토가 보다 필요하다. 그러나 콘크리트에 대한 피로성능 검토를 요구하고 있는 일본, 유럽 등의 설계기준과 달리 우리나라의 경우 열차하중이 직접 콘크리트 구조재에 작용하지 않고 콘크리트에 발생하는 응력이 상대적으로 작다는 등의 이유로(서사범, 2009) 철도관련 설계기준에서 콘크리트의 피로에 대한 검토를 생략하고 있다(대한토목학회, 2004; 한국철도시설공단, 2005; 2007). 그러나 강재와 달리 물리적 성질의 시간의존성이 큰 콘크리트의 경우 초기의 강성이나 강도가 유지된다는 가정 하의 피로성능은 큰 의미가 없을 수 있으며, 사용 환경 하에서 균열 발생으로 인한 강성저하나 처짐 증가로 인하여 피로성능이 감소할 수 있다(강보순, 2005). 특히 새로운 형식이나 구조 또는 재료를 적용한 부재의 경우 하중 전달이나 응력 분포의 상이함으로 예기치 못한 응력과 변형의 집중으로 반복하중에 의한 급격한 성능 저하가 발생할 수 있어 피로에 대한 검토가 필수적이라 할 수 있다.

이 논문에서는 반복하중 실험을 통하여 신형식 부재인 IT 거더의 피로 특성을 검토한 결과를 수록하였다. IT 거더는 기존의 도로 및 철도교에 널리 이용되었던 PSC 거더의 단면성능을 향상시킨 강합성 거더로써 중공단면을 통하여 자중을 줄이고 단면높이를 최소화 하여, 주로 30m 정도의 중·소지간에 사용되었던 PSC 거더를 30m 이상의 경간에도 도입할 수 있도록 성능을 향상시킨 구조이다. IT 거더의 피로 특성은 다음과 같은 과정을 통하여 검토하였다: (1) 반복하중 재하 장치의 성능을 고려하여 시험체를 설계한다; (2) 국내·외 설계기준 검토를 통하여 피로성능을 결정한다; (3) 시험체에 반복하중을 가하여 피로 누적에 따른 강성의 변화를 정적시험을 통하여 관찰한다; (4) 피로실험이 완료된 후 최종 강성값을 이용하여 강도를 산정하고 설계기준값과 비교한다.

II. 피로관련 설계기준

1) 국내기준

철도교에 적용되는 콘크리트 구조에 대한 국내 피로관련 설계기준은 콘크리트구조 설계기준(한국콘크리트학회, 2007), 철도설계기준(대한토목학회, 2004) 및 호남고속철도설계기준(한국철도시설공단, 2007)이 있다. 이들 설계기준은 강선 및 철근에 대한 피로 만을 검토할 것을 규정하고 있으며, 콘크리트에 대해서는 별도의 제한을 두고 있지 않다.

2) 미국기준

미국의 경우 미국콘크리트학회(ACI)는 피로특성에 관련된 S-N관계를 정의하지 않으며, 단지 미국콘크리트 학회 내의 전문연구위원회인 Committee 215(ACI, 1974)의 제안사항을 통하여 규정하고 있다. 규정된 내용은 최소응력이 0인 경우 최대응력이 압축강도의 40%를 초과하지 않으며, 최소응력이 증가하여 가 될 때 허용응력 범위는 0이 되어야 한다는 것이다. 또한 응력범위는 최대응력과 최소응력의 차이이며 선형적으로 감소해야 한다고 규정되어 있다. AASHTO(2007)의 경우도 Committee 215의 제안을 적용하고 있다.

3) 일본기준

일본 철도종합기술연구소(2004)의 기준은 콘크리트의 피로 강도의 특성치를 콘크리트의 종류, 구조물의 노출조건 등을 고려하여 규정하고 있다. 콘크리트의 압축, 휨압축, 인장 및 휨인장에 대한 설계피로강도, f_{rd} 는 일반적으로 하중의 반복횟수 과 영구하중에 의한 응력의 함수로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{rd} = k_1 f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \frac{\log N}{K}) \quad (1)$$

여기서, $N \leq 2 \times 10^6$

f_d : 콘크리트의 각각의 설계강도

K : 경량콘크리트는 10을 사용하며, 보통콘크리트는 17을 사용

k_1 : 압축 및 휨 압축 : 0.85

인장 및 휨 인장 : 1.00

σ_p : 영구하중으로 인한 콘크리트 응력 (교번하중을 받는 경우 0을 취함)

4) 유럽기준

CEB-FIP Model Code 1990(1991)경우는 비교적 상세하게 콘크리트 파괴특성을 나타내는 S-N 관계를 규정하였으며, 최소, 최대의 응력 압축응력 수준을 다음 식(2)로 정의하였다.

$$\begin{aligned} S_{c,max} &= |\sigma_{c,max}|/f_{ck,fat} \\ S_{c,min} &= |\sigma_{c,min}|/f_{ck,fat} \end{aligned} \quad (2)$$

피로강도는 다음 식(3)과 같다.

$$f_{ck,fat} = \beta_{cc}(t)\beta_{c,sus}(t, t_0)f_{ck}(1 - f_{ck}/25f_{ck0}) \quad (3)$$

압축, 인장의 경우

$$\sigma_{ct,max} < 0.026\sigma_{c,max} : \log N = 9(1 - S_{c,max}) \quad (4)$$

순수인장 및 인장, 압축의 경우

$$\sigma_{ct,max} > 0.026\sigma_{c,max} : \log N = 12(1 - S_{ct,max}) \quad (5)$$

여기서, N : 하중의 반복횟수

$S_{c,max}$: 최대 압축응력 수준

$S_{c,min}$: 최소 압축응력 수준

$\sigma_{c,max}$: 최대 압축응력

$\sigma_{c,min}$: 최소 압축응력

$\sigma_{ct,max}$: 최대 인장응력

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도

$f_{ck,fat}$: 피로압축강도 (재령28일에서 저장도의 경우 $f_{ck,fat} = 0.82f_{ck}$, 고강도의 경우 $f_{ck,fat} = 0.75f_{ck}$)

f_{ck0} : 10 MPa

$\beta_{cc}(t)$: 콘크리트 하중이 재하될 때의 콘크리트 재령에 따른 계수

$$= \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\}$$

t : 콘크리트의 재령(일)

t_1 : 1일

s : 시멘트 종류에 따라 결정

(속성 경화 고강도 콘크리트(RS) 0.2

일반 그리고 속성 경화 시멘트(N and R)=0.25

저속 경화 시멘트(SL)=0.38)

$\beta_{c.sus}(t, t_0)$: 콘크리트에 크기가 큰 지속하중이 작용하는 경우의 계수

III. 피로시험체 설계 및 실험

1) 피로시험체의 설계

부재의 피로성을 검증하기 위해서는 실제 크기의 부재를 이용하는 방법(Rao and Frantz, 1996)과 상사법칙에 따른 축소 부재를 이용하는 방법(이한선 등, 1996), 그리고 동일한 사용하중 응력을 받도록 설계된 같은 형식의 최소 크기 부재를 이용하는 방법(김정호 등, 2004) 등이 있다. 이중 실제 크기의 부재를 이용하는 방법은 가장 확실한 방법이나 실제 부재의 규모가 클 경우 비경제적이고 제한적이라는 단점이 있다. 상사법칙에 따른 축소된 부재를 이용하는 방법의 경우 경제성은 확보할 수 있으나, 상사율을 완벽히 만족시키는 부재의 구성요소를 찾거나 제작이 어렵고 실제 크기의 부재를 이용하는 방법에 비해 정확도가 떨어질 수 있다. 동일한 사용하중 응력을 받도록 설계된 같은 형식의 최소 크기 부재를 이용하는 방법은 크기는 다르나 간접적이거나 같은 형식 부재가 가지고 있을 수 있는 역학적 단점을 파악할 수 있고 경제적이라는 장점은 있으나, 역시 실제 부재의 거동을 완벽히 대표한다고 할 수 없다는 단점이 있다.

이 연구에서는 공간적, 경제적 제약을 고려하여 전술된 방법 중 세 번째 방법을 사용하여 피로시험체를 제작하였다. 먼저 지간의 10m의 1급선교로 시험체를 설계하고 실교량에 적용되는 25m ~ 40m 지간의 설계활하중에 의해 발생하는 최대응력변동범위 이상의 응력이 발생하도록 최대하중을 결정하였다. 피로에 대한 검토시 하중 재하횟수는 일본의 규정을 근거

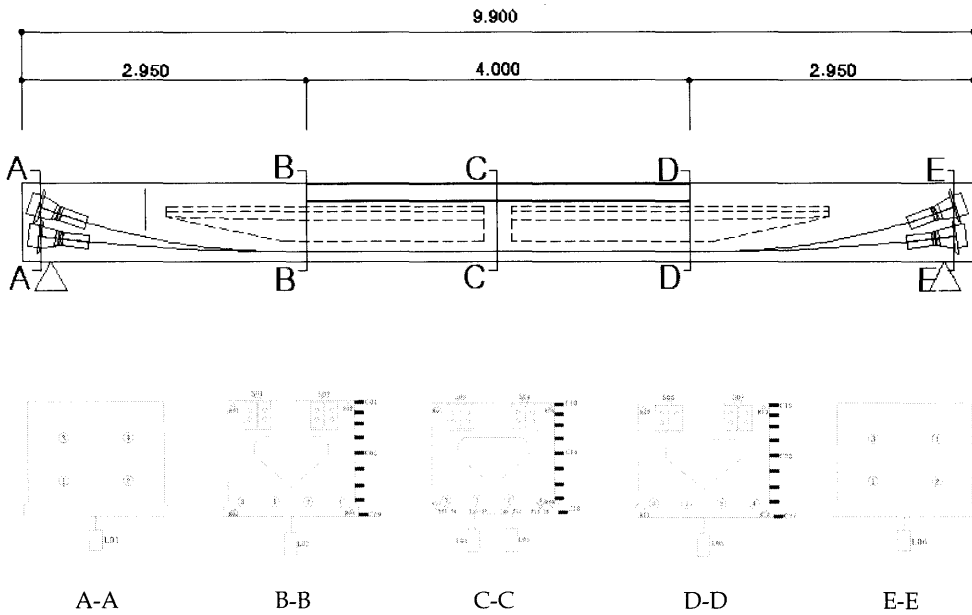
하여 200만회로 하였으며, 작용 하중범위는 사용하중에 의해 발생하는 응력을 근거로 350 KN으로 하였다. 그림 1은 실험에 적용된 IT거더의 제원 및 게이지 부착 위치이다. 설계된 시험체의 제원은 다음과 같다.

□ 설계조건

- 형 식 : 10 m 단경간 IT PSC Box교
- 폭 원 : 10.90 m
- 교량 등급 : 1급선 (설계속도 200km/hr)
- 설계 하중 : LS-22
- 거더 간격 : 2.40 m

□ 재료적 특성

- 콘크리트
 - 단위 중량 : 25.0 KN/m^3
 - 압축 강도 : 32.0 MPa (프리스트레스 도입시)
 - 40.0 MPa (사용하중 단계)
 - 탄성계수 : 26,400 MPa (프리스트레스 도입시)
 - 28,600 MPa (사용하중 단계)
- 철근 (SD30)
 - 항복 강도 : 300 MPa
 - 탄성계수 : $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
- 텐던 (SWPC 7B $\Phi 15.2 \text{ mm}$)
 - 단 면 적 : 138.7 mm^2
 - 인장 강도 : 1,900 MPa
 - 항복 강도 : 1,600 MPa
 - 탄성계수 : $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
- 강재
 - 강 종 : SM490 (H $200 \times 200 \times 8 \times 12$)
 - 탄성계수 : $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$



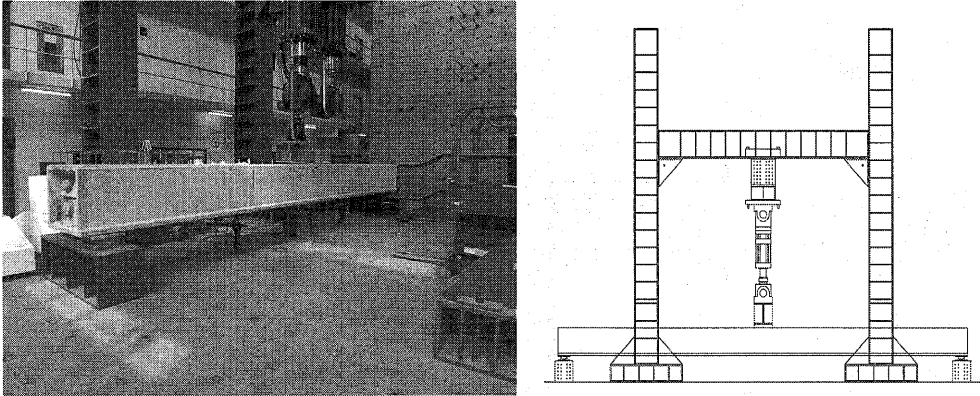
<그림 1> IT거더 시험체 제원 및 게이지 부착 위치

2) 실험 장비 및 장치

실험에 사용된 정적데이터로거는 일본 Tokyo Sokki사의 TDS-303이며, 확장 연결채널은 일본 Tokyo Sokki사의 50채널 스위치박스를 사용하였다. 피로실험 중 강재와 철근의 변형률과 거더의 처짐을 측정하기 위하여 계측센서를 부착하였다. 콘크리트와 철근, H형강 및 텐던의 변형률 측정에 사용된 게이지는 일본 Tokyo Sokki사의 제품을 사용하였다. 측정에 사용된 게이지는 표 1에 정리하였다. 반복하중 및 정적하중을 가하기 위한 가력프레임 및 피로시험체는 그림 2에 수록하였다. 참고로 실험에 사용된 액추에이터를 이용하여 최대로 가할 수 있는 하중은 500kN 가량이다.

<표 1> 변형률게이지

제품명	위치	채널수
CDP-25 (LVDT)	거더하단	6 ch.
PL-60-11 (콘크리트게이지)	콘크리트	29 ch.
WFLA-3-11 (철근게이지)	H-Beam	6 ch.
FLA-1-11 (철근게이지)	철근 및 텐던	12 ch(철근), 12 ch(텐던)



<그림 2> 피로시험체 및 가력프레임

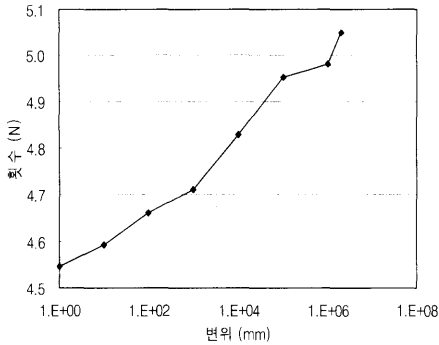
3) 피로실험

피로실험은 액추에이터를 이용하여 3점 휨시험으로 1.5 ~ 1.7Hz 주기의 10kN ~ 350kN의 힘을 반복적으로 재하하는 방법으로 수행하였다. 반복하중 재하에 따른 강성의 감소를 확인하기 위하여 반복하중 1회, 10회, 100회, 1,000회, 10,000회, 100,000회, 1,000,000회, 2,000,000회 마다 반복을 중지하고 정하중실험과 동적실험을 수행하였다. 시험체 각부에 부착했던 게이지를 이용하여 거동 특성을 분석하였다.

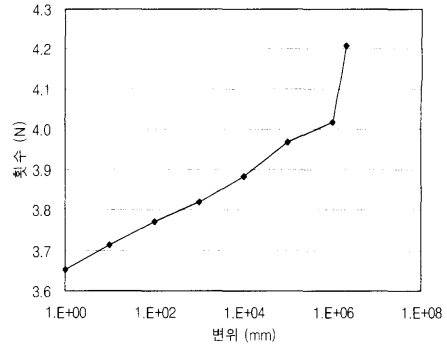
IV. 피로실험 결과 및 설능 평가

1) 피로실험 결과

그림 3 및 그림 4는 IT거더의 중앙단면과 1/4지점의 단면부의 피로하중의 반복 횟수에 따른 변위량의 변화이다. 그림에서 변위량은 하중 반복 회수의 증가에 따라 거의 선형으로 증가하는 것을 알 수 있다.



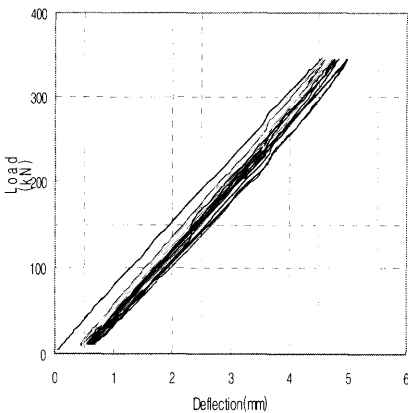
<그림 3> 1/4단면에서의 변위-반복회수



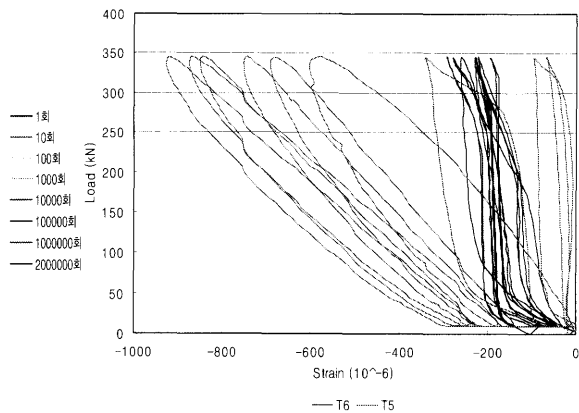
<그림 4> 중앙단면에서의 변위-반복회수

그림 5는 정하중 시험 시 중앙단면에서의 하중과 변위 관계이다. 그림에서 하중 반복이 진행될수록 피로도가 누적되어 잔류변형이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 6은 반복 하중 재하 중 수행된 정적하중 실험을 통해 측정한 H형 강재의 변형률 변화 이력이다. 중앙단면에 부착한 게이지는 하중재하를 위한 가력판의 영향으로 인하여 손실되어 1/4 단면에서의 변형률만을 얻을 수 있었다. 그림에서 T6 게이지의 경우는 뚜렷이 관찰되지 않으나 T5의 경우 반복하중이 누적되면서 잔류 변형률이 증가하고 강성이 감소하는 성향을 확인할 수 있다.

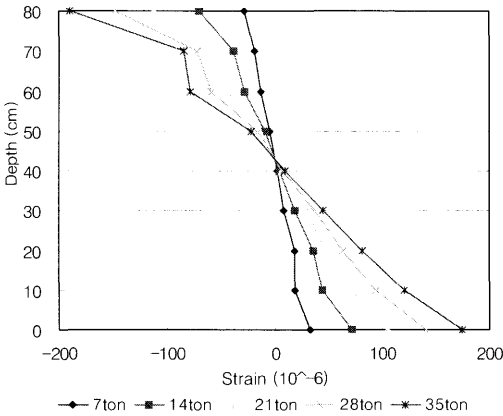
하중 반복 횟수의 증가에 따른 중립축의 변화는 그림 7과 8에 도시하였다. 그림에서 중립축은 그림 7의 1회 반복 후 하연으로부터 42cm 정도에서 반복하중이 누적에 따라 점차 올라가 그림 8의 200만회 반복 후에는 50cm 정도로 상승한 것을 확인할 수 있다. 상연 및 하연의 변형률도 하중횟수가 누적됨에 따라 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다.



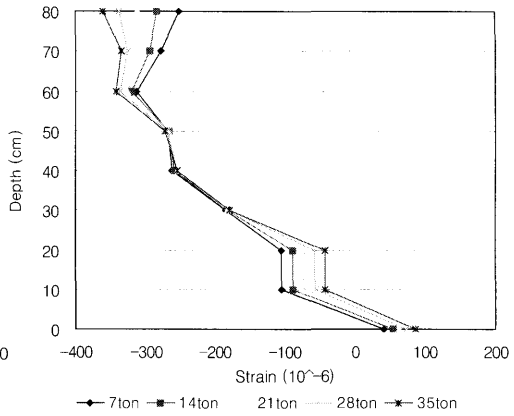
<그림 5> 중앙단면에서의 하중-변위 관계



<그림 6> 1/4단면에서의 H형 강재의 변형률



<그림 7> 중앙단면의 중립축 거동 (1회)



<그림 8> 중앙단면의 중립축 거동 (2백만회)

2) 피로성능 평가

일본 철도종합기술연구소(2004) 및 CEB-FIP(1991)의 피로성능 기준을 이용하여 200만회 반복하중 재하 후 IT거더의 성능을 평가하였다. 평가는 200만회 반복하중 재하 후 수행된 정적하중 실험의 변위를 이용하여 역산한 강도와 일본과 유럽 기준에 제시된 200만회 기준 피로강도를 비교하는 방법으로 수행하였으며, 200만회 반복하중 재하 후의 강도가 두 기준에서 제시하고 있는 피로강도를 만족하는 것으로 나타났다. 특히 IT거더 시험체는 반복하중이 200만회 재하된 이후에도 뚜렷한 균열이 발견되지 않아, 철도교와 같이 피로에 취약한 구조물에 대하여 충분한 피로성능을 가질 것으로 판단된다. IT거더의 경우 거더 내부에 배치된 철근이 주철근이 아니므로 별도의 검토를 수행하지 않았다.

○ 일본 철도종합기술연구소(2004) 제시 기준 :

$$\begin{aligned}
 f_{rd} &= k_1 f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \frac{\log N}{K}) \\
 &= 40 \times (1 - \frac{\log(2 \times 10^6)}{17}) \\
 &= 25.17 \text{Mpa}
 \end{aligned}$$

☞ 29.9Mpa > 25.17Mpa 이므로 적합

○ CEB-FIP(1990) 제시 기준 :

$$\begin{aligned}
 f_{ck, fat} &= \beta_{cc}(t) \beta_{c,sus}(t, t_0) f_{ck} (1 - f_{ck} / 25 f_{ck0}) \\
 &= 1 \times 1 \times 40 \times (1 - 40 / 250) = 28.56 \\
 &= 28.56 \text{Mpa}
 \end{aligned}$$

☞ 29.9Mpa > 28.56Mpa 이므로 적합

V. 결 론

이 논문에서는 반복하중 실험을 통하여 신형식 부재인 IT 거더의 피로 특성을 검토하였다. 일본기준에 따라 200만회 반복하중 재하를 통하여 IT 거더의 피로 누적에 따른 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 반복하중 재하에 따른 변위량의 변화 추이를 관찰한 결과 하중 반복 횟수의 증가에 따라 변위가 거의 선형으로 증가하였다.
- 콘크리트와 H형 강재에서 반복 횟수 증가에 따른 잔류 변형이 증가와 강성이 감소하는 추세를 확인할 수 있었다.
- 하중 반복 횟수 증가에 따라 중립축이 상승하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 외적으로는 뚜렷한 균열이 없었으나 내적으로 미세 균열이 성장함에 따른 것으로 판단된다.
- 200만회 재하 후 측정된 변위값을 근거로 역산된 강도를 일본과 유럽에서 제시하고 있는 피로강도와 비교한 결과 두 기준 모두 만족하는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

1. 김정호, 박경훈, 황윤국, 이상윤 (2004). "강제로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 정적 및 피로거동." 한국강구조학회 논문집, Vol.16, No.6, pp.725-736.
2. 대한토목학회 (2004). 철도설계기준.
3. 이한선, 장진혁 (1996). "철근콘크리트 축소모델의 부재거동 상사성에 관한 연구." 콘크리트학회 논문집, Vol.8, No.3, pp.177-185.
4. 철도종합기술연구소 (2004). 철도구조물등 설계표준 동해설 - 콘크리트 구조물. 환선주식회사.
5. 한국콘크리트학회 (2007). 콘크리트구조 설계기준 해설, 기문당.
6. 한국철도시설공단 (2005). 고속철도설계기준 (노반편).
7. 한국철도시설공단 (2007). 호남고속철도 설계지침 (노반편).
8. AASHTO (2007). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
9. ACI (1974). Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading, ACI 215R-74.
10. CEB-FIP (1991). CEB-FIP Model Code 1990. CEB.
11. Rao, C., Frantz, G.C. (1996) "Fatigue tests of 27-year-old prestressed concrete bridge box beams." PCI Journal, pp.74-83.

논문접수일 : 2010년 4월 21일

심사의뢰일 : 2010년 4월 23일

심사완료일 : 2010년 6월 4일