

현수교 횡프레임의 피로안전성 평가에 관한 연구(Ⅰ)

- 공칭응력에 의한 평가 -

A Study on Fatigue Safety Estimation of Cross Frame of Suspension Bridge(Ⅰ)

- Estimation by Nominal Stress -

경 갑 수¹⁾ · 전 준 창²⁾ · 서 석 구³⁾ · 용 환 선⁴⁾

Kyung, Kab Soo Jeon, Jun Chang Su, Seok Ku Yong, Hwan Sun

요 약 : 본 연구는 공칭응력 및 변동응력을 이용한 현수교 횡프레임의 피로안전성 평가를 위하여 수행되었으며, 본 논문에서는 해석모델의 모형화 방법 및 공칭응력을 이용한 피로안전성 평가를 주요 내용으로 다루었다. 본 연구의 목적에 부합되는 해석모형을 도출하고자 해석모형의 지지조건에 따른 영향, 평면해석과 입체해석간의 구조해석 결과의 차이 및 모형화되는 횡프레임 수의 영향에 대해서 검토하였다. DB-24하중을 피로조사하중으로 이용하였으며, 단일트럭하중에 의한 발생응력을 조합하여 실교통류 흐름의 효과를 고려하였다. 피로검토대상 구조상세에 대해 산출된 공칭응력을 국내 및 국외의 피로등급과 비교하고 그 결과에 대해 고찰하였다.

ABSTRACT : In this paper, the fatigue safety in the suspension bridge is investigated by using nominal and variable stress, respectively. The technique on structural modeling and the fatigue evaluation using nominal stress are mainly dealt with in this paper. To make the finite element analysis model reflecting the actual structural behavior of the suspension bridge with cross frame, the parametric study is carried out. In this study, the influence of supporting condition, the difference of the results of 2- and 3-D analysis and the number of cross frames modelled in are considered. The nominal stress under the real traffic flow of the bridge is calculated by the combination of the stresses due to the unit DB-24 loading. The nominal stresses for details under consideration are compared with allowable stress ranges specified in the codes and the results are discussed.

핵심용어 : 피로안전성평가, 횡프레임, 현수교, 공칭응력

KEYWORDS : Fatigue Safety Estimation, Cross Frame, Suspension Bridge,
Nominal Stress

1) 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
2) 정회원, (주)서영기술단 과장
3) 정회원, (주)서영기술단 상무이사

4) 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수
본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

현수교는 다른 형식의 교량에 비하여 강성이 작기 때문에 변형이 크고 진동하기 쉬우므로 보강형에 의해 바닥판 구조를 지지시켜 변형이나 진동을 억제하고 주행성을 확보한다. 이러한 보강형은 바닥틀, 횡트러스나 횡프레임 및 보강형 트러스 등을 포함하는 구조를 총칭하는데 일반적으로 보강형 구조로서는 트러스 형식과 상자형 형식이 주로 사용된다. 보강형 구조내의 횡트러스·횡프레임의 역할은 바닥틀로부터의 하중을 보강형 및 현수재에 전달하고, 상자형에서의 다이아프램과 같이 전단변형에 저항하며, 횡하중 및 비틀림하중에 저항하는 구성부재의 하나로서 작용한다. 따라서 횡트러스·횡프레임의 격점부는 복잡한 구조가 되므로 보강 트러스와의 연결구조를 사전에 충분히 검토하는 것이 중요하다¹⁾.

본 연구에서 대상으로 하는 현수교는 보강형 상층 및 하층에 각각 4차선의 자동차 전용도로를 갖고 있어 공간적으로 횡트러스(수직브레이싱)를 구성하는 것이 불가능하기 때문에 주구수직재 및 상하의 가로보로 이루어진 횡프레임 구조로 되어 있다. 보강형이 횡프레임 구조인 예는 국내의 영종대교 및 일본의 레인보우교 등이 있다. 이와 같은 형식의 횡프레임은 일반적으로 횡트러스에 비해 보강형 격점부에서의 하중집중으로 인해 부재 단면력이 크게 발생하므로 설계에서는 이러한 특성을 충분히 고려하여야 한다^{2,3)}.

본 연구대상 현수교의 횡프레임은 앞서 기술한 구조적 특성외에도 타부재와의 연결 및 제작과 유지관리를 위한 맨홀 등의 구조상세를 갖고 있어 구조적으로 낮은 피로강도를 갖는 구조상세가 다수 존재하여 피로안전성에 대한 검토가 구조물의 안전성평가의 중요항목으로 부각되었다⁴⁾. 일반적으로 구조물의 피로안전성 평가방법은 크게 3가지, 즉 공칭응력, 국부응력 그리고 변동응력에 의한 방법으로 구분될 수 있다. 공칭응력에 의한 피로안전성 평가는 가장 일반적일 뿐만 아니라 현재 국내 도로교 표준시방서상에 규정된 방

법이며, 국부응력에 의한 평가는 주로 기하학적 형상변화로 인해 발생하는 응력집중 효과를 고려하기 위해 실시된다. 한편, 변동응력을 이용한 평가방법은 공칭응력에 의한 평가방법에서 소요의 피로강도를 확보하지 못한 경우에 실시하는 상세 피로해석이다⁵⁾.

본 연구는 공칭응력 및 변동응력에 의한 피로조사방법을 이용해서 현수교 횡프레임의 피로안전성을 평가하기 위해 실시되었다. 본 논문에서는 횡프레임 형식의 보강형 단면을 갖는 현수교의 구조적 특성을 최대한 반영할 수 있는 해석모형을 도출하고, 이에 대한 구조해석 결과에 기초하여 공칭응력에 의한 피로안전성 평가를 중심으로 기술하였다.

해석모형의 지지조건에 따른 영향, 평면해석과 입체해석간의 구조해석 결과의 차이 및 모형화되는 횡프레임 수의 영향에 대해서 검토하여 횡프레임 형식의 보강형 단면을 갖는 현수교의 구조적 특성을 최대한 반영하고, 본 연구의 목적에 부합하는 해석모형을 도출하였다. 실교량에서의 교통류 상태를 반영하기 위해 단일 DB-24 하중에 의한 구조해석 결과를 조합하여 공칭응력을 산정하였으며, 이를 국내외의 피로규정과 비교하였다.

2. 횡프레임의 구조해석

2.1 구조해석 모델의 결정

공칭응력을 이용한 구조계의 피로안전성 평가에 있어서 가장 기본적인 요소는 구조계의 거동상태를 정확히 반영하는 해석모델을 모형화하는 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 구조계는 총 연장이 900m인 현수교로서 전체 구조계를 해석모델로 한 구조해석을 통해 공칭응력을 산출하는 것은 모델링에 소요되는 노력과 시간을 감안할 때 그다지 바람직한 방법이 되지 못한다. 따라서 구조계의 일부분만을 모형화하여 구조해석을 실시하는 것이 일반적이며, 이 경우 평면해석과 입체해석으로 대별할 수 있다. 본 연구에서는 합리

적인 구조해석 모형을 도출하고자 평면해석과 입체해석간의 구조해석 결과의 차이를 검토하였으며, 입체해석의 경우에는 고려되는 횡프레임의 수도 해석변수로 취하였다.

또한, 현수교는 구조특성상 현수 구조부의 사하 중은 이들을 매달고 있는 행어에 직접 전달되지만 집중 활하중은 그 부근의 행어에 거의 전달되지 않고 주구사재를 통해서 보강형에 전달된다. 따라서 힘이 전달되는 개소를 주구 트러스 격점으로 하면 주구사재의 교점이 상축에 있는가 또는 하축에 있는가에 따라 지점계가 달라진다. 현수교의 이와 같은 구조적 특성을 고려하여 본 연구대상 현수교의 구조해석에서는 2가지 지점계에 대해 구조해석을 실시하고 그 결과를 비교·검토하였으며, 검토결과로부터 본 연구의 목적에 부합되는 지점계를 선택하였다.

구조계의 단면특성은 기존의 자료에 기초하여 산정하였으며^{4,6)}, 해석프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS Ver.12.3a를 사용하였다⁷⁾.

2.1.1 지점조건

본 절에서는 현수교 보강형 트러스의 구조적 특성을 고려하여 상지점계 및 하지점계의 2가지 해석모형에 대해 구조해석을 실시하였다. 2가지 지점계에 대해 구조해석을 실시한 것은 지점조건에 따른 단면력 변화의 유무 및 어떤 지점계를 사용하는 것이 보다 해석에 있어 타당한가를 검증하기 위한 것이다.

그림 1은 지점조건에 따른 거동특성을 규명하기 위해 간략하게 보강형 트러스의 횡프레임을 2 차원으로 모형화한 것이다. 그림 1(a)는 행어의 강성을 스프링 요소로 모형화한 상지점계이며, 그림 1(b)는 하지점계에 대한 해석모형이다. 그림 1에서 하중경우 1(LC1)과 하중경우 2(LC2)는 각각 횡프레임 중앙부분에 가장 큰 단면력이 발생되도록 단위하중을 재하시킨 경우이다. 각 하중 경우에 대한 해석결과 중 휨모멘트선도를 그림 2에 나타내었다. 지점조건에 따른 해석결과를 나타낸 그림 2에 의하면 휨모멘트도의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있으며, 이는 현수교 횡프레임에

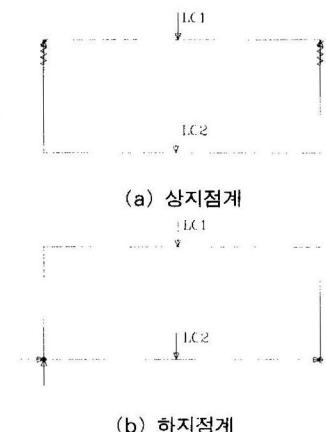
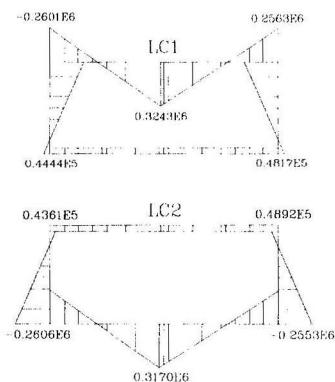
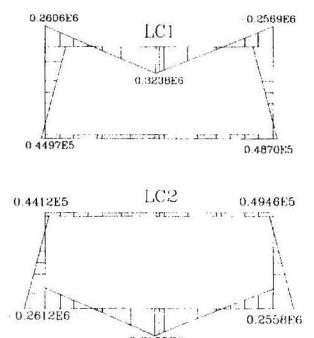


그림 1. 상·하지점계 해석모형 및 하중조건



(a) 상지점계



(b) 하지점계

그림 2. 상·하지점계 해석모형의 구조해석결과

대한 구조해석시 어떠한 지점조건을 사용하여도 구조해석 결과에는 거의 영향을 미치지 않는다는

것을 의미한다. 그러나 본 연구에서는 행어 탄성의 영향이 반영되는 상지점계가 하지점계에 비해 실제로 근접한 구조거동 상태를 나타낼 것으로 판단되어 상지점계를 지지조건으로 선택하였다.

2.1.2 평면모델과 입체모델

본 연구에서 대상으로 하는 현수교 횡프레임과 같은 구조는 평면해석 또는 입체해석을 통해 단면력을 산출할 수 있다. 일반적으로 평면해석은 입체해석에 비해 구조해석에 소요되는 노력 및 시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 해석결과의 정도가 다소 떨어지는 문제가 있다. 본 연구에서는 평면해석과 입체해석에 따른 해석결과의 차이를 검토하고 이로부터 본 연구의 목적에 부합되는 해석모형의 기본적인 형식을 결정하고자 한다.

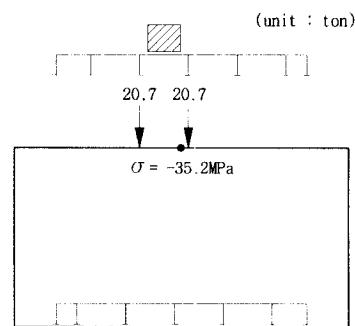
평면해석을 통해 본 연구대상 횡프레임의 공칭용력을 산출하는 방법은 크게 두 가지로 구분될 수 있으며, 이를 표 1에 비교하여 나타내었다.

표 1. 횡프레임의 평면해석방법

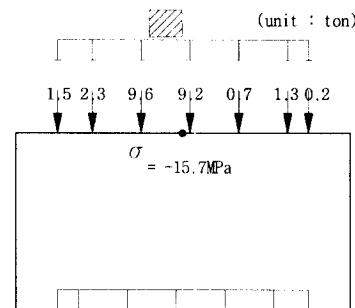
구 분	해 석 방 법 1	해 석 방 법 2
횡프레임 작용력 산정	· 일정 구간의 바닥판을 연속보로 모형화하여 해석대상 횡프레임 위치에서의 최대 반력 산출	· 일정 구간의 바닥판을 격자구조로 모형화하여 해석대상 횡프레임 위치에서의 최대 반력 산출
횡프레임 단면력 산정	· 평면 횡프레임에 단위하중을 차선별로 재하하여 검토위치에서의 단면력 영향선 작성 · 영향선의 종거에 최대 반력을 곱하여 단면력 산출	· 반력을 평면 횡프레임에 직접 재하하여 단면력 산출

표 1에 나타낸 두 가지 해석방법의 해석결과 차이를 살펴보기 위하여 보강형 상층 3차선에 DB-24 하중이 재하된 경우에 대해 재하하중의 위치 및 크기 그리고 이때의 상부 횡프레임 중앙부에서의 발생응력을 그림 3에 비교하여 나타내었다. 또한, 바닥판 및 주구 횡프레임을 3차원으로 모형화하여 얻어진 해석결과도 그림 3에 함께 나타내었다. 그림 3에 나타낸 재하하중은 표 1에

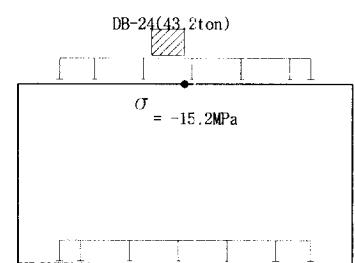
서의 반력에 해당하며, 그림 3의 해석방법 1에 의한 해석결과는 기존의 연구보고서⁸⁾의 자료를 인용한 것이다.



(a) 평면해석방법 1



(b) 평면해석방법 2



(c) 입체해석

그림 3. 해석방법에 따른 해석결과의 비교

그림 3에 나타낸 해석방법의 차이에 따른 해석결과를 살펴보면 평면해석 방법 1(그림 3(a))에 의한 결과는 다른 두 가지 방법에 의한 해석결과에 비해 상당히 과대평가 됨을 알 수 있으며, 이는 해석시 하중의 횡분배에 대한 고려가 되지 않

았기 때문으로 판단된다. 한편, 평면해석방법 2와 입체해석에 의한 해석결과는 상호간 약 3%정도의 미소한 차이를 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 단순히 횡프레임의 공칭응력만을 산출하여 피로안전성 평가를 수행하고자 하는 경우에는 입체모형에 대한 해석보다는 표 1의 평면해석방법 2에 의한 방법이 보다 효율적이라 판단된다. 그러나 본 연구에서는 공칭응력에 의한 피로평가뿐만 아니라 변동응력에 의한 피로평가도 함께 수행하고자 하며, 변동응력에 의한 평가에서는 검토대상부의 영향면이 기초자료로서 이용되고 이를 도출하기 위해서는 입체해석 모형이 필요하므로 본 연구에서는 입체해석 모형을 횡프레임의 공칭응력을 산정하기 위한 기본형식으로 결정하였다.

2.1.3 고려되는 횡프레임의 수

현수교 횡프레임의 공칭응력을 산정하기 위한 구조해석시 해석모형을 3차원으로 하는 경우에 모형화되는 횡프레임의 수에 따른 구조해석결과를 검토하고자 그림 4와 같이 5가지의 해석경우를 상정하였다. 모형화되는 횡프레임의 수가 증가 할수록 해석결과는 실제의 거동에 가까워지지만 해석모형의 작성시 소요되는 시간과 노력을 고려해 볼 때 효율적인 해석모형을 결정하기 위해서는 이에 대한 검토가 필요하다.

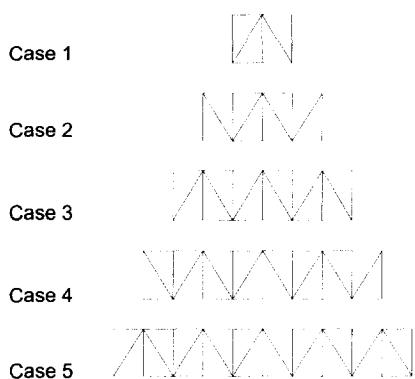
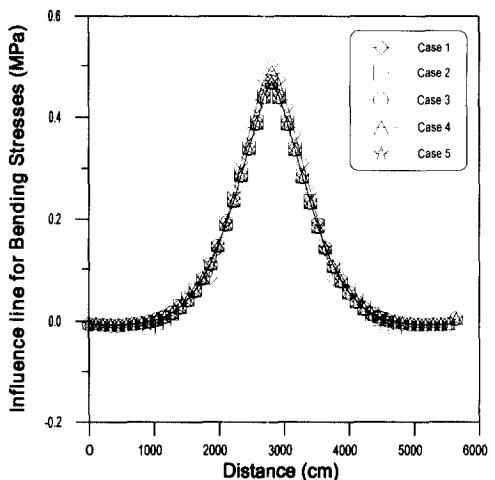
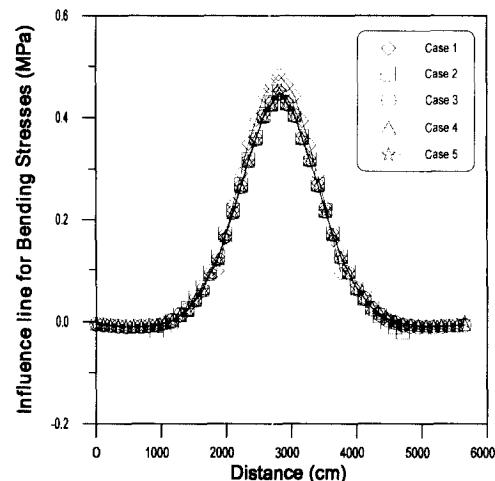


그림 4. 횡프레임의 수에 따른 해석모형



(a) 상부 횡형 중앙부



(b) 수직재 니브레이스부

그림 5. 중앙 횡프레임의 휨응력에 대한 영향선

그림 4에 나타낸 5가지의 해석모형에 대해 단위하중을 이동시켜가며 구조해석한 결과 중 중앙부 횡프레임의 상부 횡형 중앙부와 수직재의 니브레이스부에서의 가장 지배적인 응력성분인 휨응력에 대한 영향선을 그림 5에 비교하여 나타내었다. 그림 5의 해석결과는 각 검토위치에서 최대 휨응력이 발생되도록 재하된 경우의 해석결과이다. 각 해석모형에 대한 구조해석 결과의 상호

간 비교를 위하여 해석경우 5의 최대 휨응력으로 각 해석경우의 최대 휨응력을 나누어 나타낸 것이 그림 6이다. 그림 6에 의하면 해석결과는 모형화하는 횡프레임의 수에 영향을 받으며, 횡프레임의 수가 증가할수록 일정한 값에 수렴한다는 것을 알 수 있다. 대체로 해석경우 3, 즉 모형화된 횡프레임의 수가 7개인 해석모형에서 1에 수렴하므로 본 연구에서는 7개의 횡프레임으로 구성된 해석모형을 현수교 횡프레임의 공칭응력을 산정하기 위한 구조해석모형으로 결정하였다. 한편, 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 검토대상 횡프레임에서 일정거리 이상의 위치에 하중이 재하되는 경우는 검토위치에 영향을 미치지 않으므로 구조해석을 통해 계산된 발생응력을 피로안전성 평가시에 사용할 응력범위의 값으로 보아도 무리가 없는 것으로 판단된다.

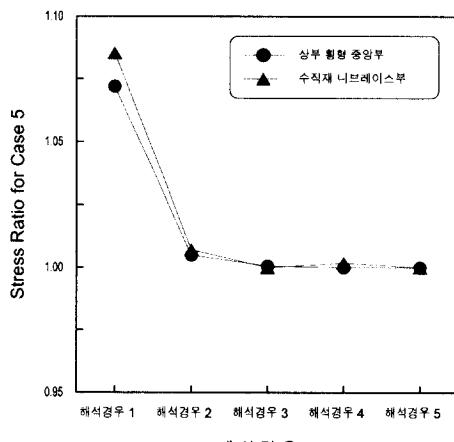


그림 6. 해석경우 5에 대한 응력비

2.1.4 구조해석 모형

구조해석 모형은 현수교의 구조적 특성상 현수교 중앙경간의 약 1/4구간이 구조적으로 취약하다는 점과 피로에 불리한 구조상세가 다수 존재하는 횡프레임을 대상으로 하기 위해 그림 7과 같이 해석대상구간을 선정하였으며⁶⁾, 2.1.1절~2.1.3 절의 구조해석 결과에 기초하여 본 연구의 대상인 현수교 횡프레임을 그림 8과 같이 모형화하였다.

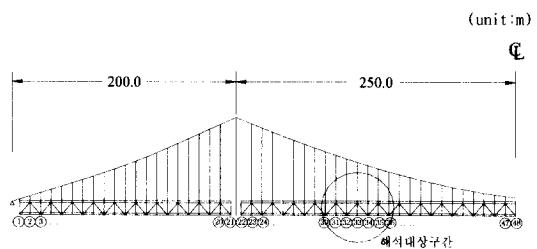


그림 7. 해석대상 구간

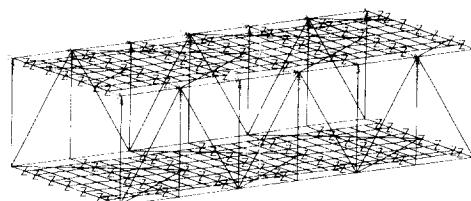


그림 8. 현수교 횡프레임의 구조해석모형

본 연구의 피로 안전성 평가대상 횡프레임은 해석모형의 중앙 횡프레임인 33번 횡프레임이다. 행어는 스프링요소, 보강형 및 강상판은 보요소로 모형화하였으며, 강상판의 탄성지점은 교축방향과 교축 직각방향으로의 가동 및 고정의 영향을 반영할 수 있도록 절점(joint)요소로 모형화하였다. 그리고 우각부는 강역으로 처리하였다.

2.2 하중조건

연구대상인 현수교 횡프레임의 공칭응력을 산정하기 위해 적용한 재하하중은 도로교 표준시방서에서 1등교 설계에 규정하고 있는 DB-24하중 (총중량 43.2ton)이며, 또 안전측 평가가 되도록 후륜 축간거리를 4.2m로 하여 피로에 가장 불리하게 재하시켰다. 하중경우는 그림 9와 같이 8가지 경우로 구분하였다.

그림 9와 같은 DB-24 하중의 단일 재하시의 구조해석 결과를 실교량에서의 교통류 상태로 변환하기 위하여 다음 그림 10과 같이 단일 재하트력을 3가지 종류로 하중조합하였다. 하중조합 1은 중차량의 통행차선인 상·하층의 3차선과 4차

선에 DB-24 하중이 재하된 경우로서 일반적인 교통류 상태에 해당하며, 하중조합 2는 실제적인 교통류 상태는 아니지만 편측 재하에 따른 영향을 검토하기 위한 하중조합이다. 그리고, 하중조합 3은 상·하층의 각 차선에 DB-24 하중이 만재된 경우로서 검토대상 구조상세에 최대 응력을 유발시키는 하중조합이다. 일반적으로 피로검토시 현재 기준 각국 시방서에서는 피로설계 하중트럭으로 대개 40ton 이하의 하중을 채택하며, 후륜 축간거리를 4m~9m 정도의 값을 취하고 있다. 또한, 트럭이 동시에 재하되는 경우의 영향을 고려하는 동시재하계수도 1.2 정도를 적용하고 있다⁴⁾. 이러한 점을 고려해 볼때 재하하중으로서 DB-24 하중을 피로설계하중의 대표하중으로 고려하고 그림 10과 같이 재하하는 하중조건은 상당한 안전측 검토가 될 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 대상으로 하는 현수교 횡프

레임의 경우, 국내의 도로교 표준시방서상에 충격 계수에 대한 명확한 규정이 없으므로 해석결과에는 충격의 영향을 반영하지 않았으나, 피로안전성 평가시 15% 정도의 충격계수를 고려하여 해석결과가 허용피로응력을 초과하는 경우에는 불안전한 구조물로 평가되도록 조치하였다.

3. 공칭응력을 이용한 피로안전성 평가

3.1 피로평가대상 구조상세 및 구조해석결과

일반적으로 피로안전성 평가는 피로등급이 낮은 구조상세 및 기하학적 불연속부, 하중재하점 등 구조적으로 큰 응력이 발생되는 구조상세를 대상으로 한다. 표 2는 설계도서에 대한 검토를 통해 본 연구대상 횡프레임에 위치한 구조상세 중 피로에 취약한 구조상세 및 해당 피로등급을

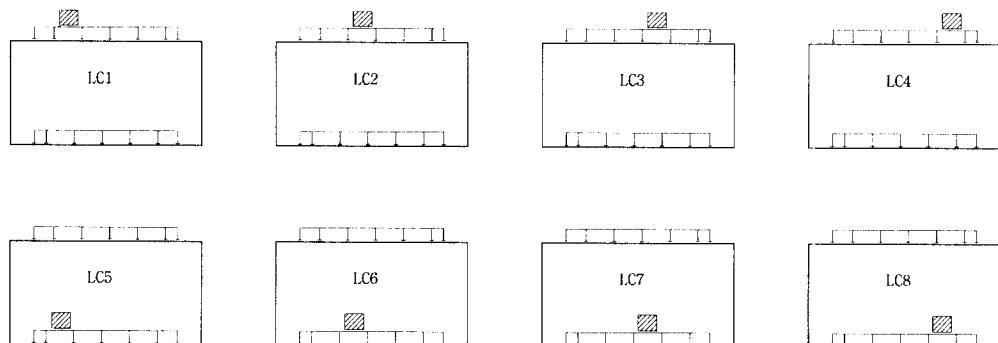


그림 9. 횡프레임의 구조상세별 공칭응력 검토에 사용된 하중경우

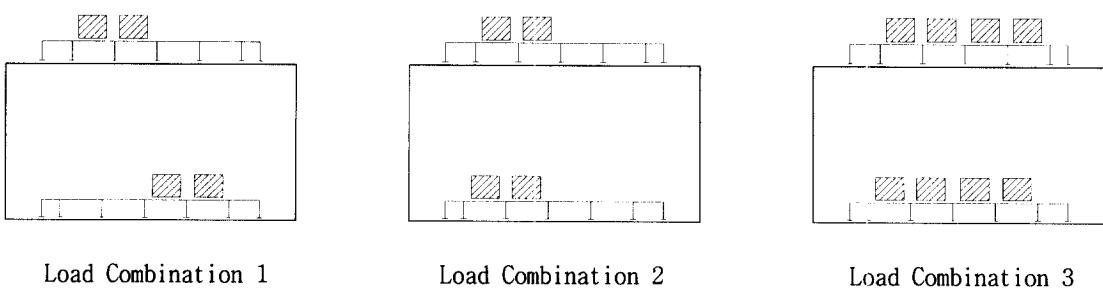


그림 10. 하중조합

나타낸 것이다^{9,10,11)}. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 구조상세에 대해서도 국가별로 피로등급 적용에 관한 시방규정이 다소간 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, 표 2에 나타낸 검토대상 구조상세 중 B-B단면, 즉 수직재 우각부 연결부의 피로등급은 국내 도로교 표준시방서 및 AASHTO 시방서에 따를 경우에 평가자의 관점에 따라 C등급 또는 E' 등급으로 평가될 수 있다.

표 2의 피로안전성 평가대상 구조상세의 각 하중경우별 최대 발생응력을 정리하여 표 3에 나타내었다. 검토 대상부위에서의 최대 발생응력은 하중재하위치에 따라 그 값이 변화하는 것을 알 수 있는데, 일반적으로 검토 대상부위에 하중이 재하되는 경우에 응력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 3의 하중경우별 발생응력 중 음영으로 표시한 최대 발생응력을 이용하여, 즉 DB-24 (43.2ton)하중을 하나의 대표하중인 피로 설계하중으로 간주하고 각 구조상세에 대한 피로검토를 간략하게 실시하면 연구대상 횅프레임 단면내의 각 구조상세에서 발생하는 최대응력은 허용피로응력범위에 비해 상당히 작은 값임을 알 수 있다. 여기서, 최대발생응력을 피로평가에 사용한 것은 2.1.3절에서의 구조해석에 의한 영향선 해석에 의해 각 구조상세에서의 최대 발생 응력범위는 최대 발생응력과 거의 동일하다는 것에 기초한 것이다.

3.2 피로안전성 평가결과

그림 10의 하중조합에 따라 단일재하시에 얹어진 발생응력의 절대값을 각 하중조건에 부합되도록 중첩시켜 각 검토대상 구조상세별 응력범위를 정리하면 다음 표 4와 같다. 표 4의 하중조합 3은 도로교 표준시방서 규정에 따라 발생응력의 75%만을 고려하였다.

실제 교통류의 흐름보다 안전율을 높게 고려한 DB-24 설계하중의 조합에 의한 피로검토 결과, 검토대상 구조상세부의 피로강도는 최대응력범위만을 기준으로 판단한다면, 일부 구조상세에 대해

서는 국내 도로교 표준시방서, JSSC 및 AASHTO에서 규정하고 있는 소요 피로강도를 만족시키지 않는 구조상세가 있음을 알 수 있다. 그러나 피로등급이 낮은 맨홀과 피로등급 분류가 불명확한 수직재 니브레이스 단부를 제외한 나머지 구조상세는 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부에 대한 그라인더 다듬질에 의해 소요 피로강도를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 평가는 일반적으로 용접지단부에 대한 그라인더 다듬질에 의해 피로등급이 한 단계 정도 상승한다는 것에 근거하며¹²⁾, 실제로 JSSC 규정은 표 2에 나타낸 바와 같이 용접지단부의 처리 상태에 따라 다른 피로등급을 적용하고 있다.

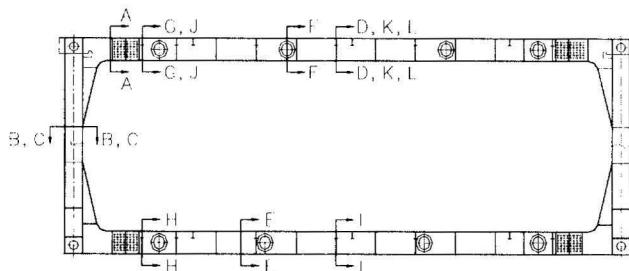
한편, 발생응력범위가 최대인 경우에 대해 AASHTO LRFD¹³⁾ 및 AASHTO 피로설계지침에서 규정하고 있는 15%의 충격효과를 고려하더라도 앞서와 동일한 평가결과를 얻을 수 있음을 표 4를 통해 알 수 있다.

맨홀을 갖는 구조상세는 소요 피로강도를 만족하지 않으므로 제작 및 용접순서를 고려하여 맨홀을 제거하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, 수직재 니브레이스 단부는 비록 JSSC 규정을 만족하지만 도로교 표준시방서 및 AASHTO 규정에 의한 평가에서 이음상세를 일반적인 필렛용접이음으로 보지 않고 필렛용접한 부착물이 종방향으로 재하되는 경우로 간주하면 소요 피로강도를 만족하지 않으므로 이러한 구조상세에 대해서는 보다 상세한 해석인 변동응력해석이 필요하므로 이에 대해서는 후속 논문에서 다루기로 한다.

이상에서 살펴본 바를 종합하면 공칭응력에 의한 피로조사는 평가대상 구조계에 대한 정확한 해석모델의 모형화와 구조상세의 피로등급이 명확하게 분류될 수 있는 경우에는 매우 유용한 방법이다. 그러나 기하학적 형상변화에 따른 응력집중 효과를 반영하기가 용이하지 않으며, 시방서에 규정된 구조상세의 제한성 및 시방서 규정의 해석방법 등에 따라서 공칭응력에 의한 피로평가는 한계성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

표 2. 피로검토 대상이 되는 구조상세부 및 피로등급

단면	피로등급		피로검토 위치
	JSSC	도로교 표준시방서 및 AASHTO	
A-A	E	C	횡형의 하부 플랜지와 니브레이스의 교차부
B-B	E(다듬질) F(비다듬질)	C ¹⁾ 또는 E' ²⁾	트러스 수직재의 내측과 니브레이스의 교차부
C-C	E	C	트러스 수직재의 외측 플랜지와 다이아프램의 교차부
D-D	D	C	횡형의 복부판과 중앙부 lateral gusset plate의 교차부
E-E	D	C	횡형의 복부판과 외측부 lateral gusset plate의 교차부
F-F	E(다듬질) F(비다듬질)	E'	횡형의 맨홀 cutout의 상단부
G-G	E(다듬질) F(비다듬질)	E	상부 횡형의 상단과 용접 bearing pedestal plate의 교차부
H-H	E(다듬질) F(비다듬질)	E	하부 횡형의 상단과 용접 bearing pedestal plate의 교차부
I-I	E	C	하부 횡형의 상단과 다이아프램의 교차부
J-J	E	E	횡형 복부판의 내부 다이아프램 플랜지 plate의 교차부
K-K	E(다듬질) F(비다듬질)	E'	횡프레임 거세트와 횡형 복부판과의 용접
L-L	D	B'	횡형 플랜지와 복부판의 필렛용접



※1) 일반적인 필렛용접이음으로 간주하는 경우

2) 필렛용접한 부착물이 종방향으로 재하되는 것으로 간주하는 경우

표 3. 대상 구조상세부의 하중경우별 발생응력

단면	하중경우별 발생응력 (MPa)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8
A-A	-9.4		-11.4	-8.3	-2.7	-3.5	-3.8	-3.5
B-B		-10.0	-8.0	-5.3	7.3	6.7	5.1	3.1
C-C		9.1	7.4	4.9	-2.9	-3.4	-2.9	-1.8
D-D	-11.2		-11.7	-5.4	0.6	0.8	0.9	0.8
E-E	2.1	2.4	2.5	2.1		-9.8	-3.7	0.0
F-F		-11.4	-5.8	-2.0	0.5	0.6	0.7	0.7
G-G	0.3	5.4		5.4	1.4	2.0	2.3	2.2
H-H	3.0	3.6	3.6	3.1	-1.5	5.2		6.7
I-I	1.8	2.1	2.1	1.7	-6.3			-6.5
J-J	0.1	3.9		3.9	0.9	1.3	1.5	1.5
K-K	3.0		3.2	1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0
L-L	9.2		9.7	4.1	-1.8	-2.1	-2.1	-1.8

※표에서 음영으로 나타낸 부분은 최대응력이 발생하는 하중경우임.

표 4(a). JSSC 규정에 따른 피로검토 결과 (단위 : MPa)

단면	피로등급	허용응력 범위	발생응력범위			대책 및 최종판정		
			하중조합 1	하중조합 2	하중조합 3	대책	피로등급 (허용응력범위)	최종판정
A-A	E	62	28.9	27.8	41.1	-	-	OK
B-B	E	62	28.4	34.2	41.8	-	-	OK
	F	46	28.4	34.2	41.8			
C-C	E	62	23.1	24.7	31.3	-	-	OK
D-D	D	84	28.1	27.8	35.0	-	-	OK
E-E	D	84	8.2	25.3	25.2	-	-	OK
F-F	H	23	24.5	24.2	25.1	맨홀 제거	A (190)	OK
G-G	E	62	10.2	9.1	19.2	-	-	OK
	F	46	10.2	9.1	19.2			
H-H	E	62	20.7	13.3	25.6	-	-	OK
	F	46	20.7	13.3	25.6			
I-I	E	62	23.6	23.4	35.2	-	-	OK
J-J	E	62	7.0	6.2	13.4	-	-	OK
K-K	E	62	9.5	9.5	12.1	-	-	OK
	F	46	9.5	9.5	12.1			
L-L	D	84	25.9	25.9	32.7	-	-	OK

※ 허용응력범위는 일정진폭응력($\Delta\sigma_{ce}$)하의 하한계에 대한 것임.

음영으로 표시한 난은 허용응력범위를 초과하는 응력범위

표 4(b). 도로교 표준시방서 및 AASHTO 규정에 따른 피로검토 결과 (단위 : kg/cm²)

단면	피로등급	허용응력 범위	발생응력범위			대책 및 최종판정		
			하중조합 1	하중조합 2	하중조합 3	대책	피로등급 (허용응력범위)	최종판정
A-A	C	774	295	283	419	-	-	OK
B-B	C	774	290	349	426	-	-	비고 참조 ^a
	E'	92	97	97	109			
C-C	C	774	236	252	319	-	-	OK
D-D	C	774	286	283	356	-	-	OK
E-E	C	774	84	258	257	-	-	OK
F-F	E'	92	209	97	155	맨홀 제거	A (1680)	OK
G-G	E	162	104	93	105	그라인더 다듬질	D (351)	OK
H-H	E	162	211	136	161	그라인더 다듬질	D (351)	OK
I-I	C	774	241	239	359	-	-	OK
J-J	E	162	71	63	137	-	-	OK
K-K	E'	92	97	97	123	그라인더 다듬질	E (162)	OK
L-L	B'	774	264	264	333	-	-	OK

※ 허용응력범위는 단계하경로 구조물의 2백만회 이상에 대한 것임.

음영으로 표시한 난은 허용응력범위를 초과하는 응력범위

a : 피로등급의 적용이 불명확한 구조상세 → 변동응력해석을 통해 최종 판정

4. 결 론

공칭응력을 사용한 피로안전성 평가를 위한 구조 해석모형의 모형화 및 구조해석의 결과에 기초한 현수교 횡프레임의 피로 안전성평가로부터 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 현수교 횡프레임의 구조해석은 설계단계에서 해석의 간략화를 위해 일반적으로 적용하는 하지 접계를 사용하여도 무방하다. 그러나 바닥판을 단지 연속보로 모형화하여 단면력을 산출하면 해석 결과는 상당히 과대평가되므로 피로안전성 검토를 위해서는 본 연구와 같이 3차원 입체 모델 또는 바닥판을 격자로 모형화하여 단면력을 산출해야 한다. 한편, 해석모형을 3차원 입체 모델로 모형화하는 경우, 고려되는 횡프레임의 수에 따라 단면력은 다소 영향을 받으나 횡프레임의 수가 증가할수록 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.
- 2) 현수교 횡프레임의 피로안전성은 피로등급의 적용이 불명확한 구조상세를 제외하고는 공칭응력을 이용한 평가만으로도 충분함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 알 수 있듯이 국가별 피로등급 규정의 차이 및 시방서에 규정된 구조상세의 제한성 등에 따라 구조상세별 적용등급은 평가자의 주관에 따라 달라질 수 있는 문제점이 있으므로 이를 해결하기 위해서는 국내에서도 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 日本土木學會, 懸垂橋-技術とその變遷, 1996
- (2) Izumi, K., Odagiri, N., Yoshijima, S. and Ogihara, M., "Design and Construction of the Superstructure of Rainbow Bridge, Bridge and Foundation

Engineering, Vol.27, No.11, pp.19-27, 1993

- (3) Yamasaki, Y., Yamazaki, T., Tsuchida, H. and Cho, C.Y., "The Detailed Design of Superstructure of Yongjong Grand Suspension Bridge", 5th PSSC, pp.547-552, 1998
- (4) 한국강구조학회, 광안대로(현수교) 설계도 검토, 응력해석 및 시방·검사지침에 관한 연구, 1998
- (5) 林猛, 梶原仁, 長谷川洋介, "JSSC指針に基づく鋼構造物の疲労安全性照査プログラムの開発とその利用", 鋼構造論文集, 第2卷, 第8號, pp.37-45, 1995
- (6) 광안대로 설계도서
- (7) LUSAS User Guide, FEA Ltd., 1997
- (8) (株)長大, 廣安大路懸垂橋部主横フレームの疲労照査, 1997
- (9) 대한토목학회, 도로교 표준시방서, 1996
- (10) (社)日本鋼構造協会編, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993
- (11) AASHTO, Standard Specification for Highway Bridges, 17th Ed., 1996
- (12) Maddox, S.J., Fatigue Strength of Welded Structures, Abington Publishing, 1991
- (13) AASHTO, Third Draft LRFD Specification and Commentary, 1992

(접수일자 : 1999년 5월 11일)