

강바닥판 데크플레이트와 종리브 현장연결 스캘럽부의 피로강도 평가

Evaluation of Fatigue Strength in Scallop at Field Bolted Joints of Longitudinal Rib and Deck Plate in Orthotropic Steel Decks

최 동 호¹⁾ · 최 항 용²⁾
Choi, Dong Ho Choi, Hang Yong

요 약 : 본 연구에서는 국내에 적용된 강바닥판의 데크플레이트와 종리브 현장연결 스캘럽부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 또한, FEM해석을 통하여 스캘럽 길이, 스캘럽 곡률반경, 데크플레이트 두께 등과 같은 매개변수가 종리브 스캘럽부의 응력에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 통하여 종리브 스캘럽부에 대한 S-N선도를 추정하였다. 피로실험을 수행한 결과, 낮은 응력수준에서는 스캘럽부에서 피로균열이 발생하였고, 높은 응력수준에서는 핸드홀 덮개판의 파괴 후에 종리브의 갑작스런 파괴가 일어났다. 피로실험결과를 JSSC 피로등급과 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의한 피로강도와 비교검토했던 결과, 데크플레이트와 종리브 현장연결 스캘럽부는 규정된 피로등급을 만족하였다.

ABSTRACT : Static and fatigue tests were performed to evaluate fatigue strength in scallop at field bolted joints of longitudinal rib and deck plate in orthotropic steel decks. Numerical parametric studies using finite element analysis were also conducted to show the influence of parameters such as length and radius of scallop, and thickness of deckplate on the stress concentration at the scallop. In the low stress level, fatigue tests yielded cracks at the scallop while in the high stress level, catastrophic failure of longitudinal rib occurred following the failure of handhole cover plate. Fatigue strength was compared with JSSC specification and the predicted S-N curves using Shigley and Juvinall methods, and a satisfactory result was obtained.

핵심 용어 : 강바닥판, 데크플레이트, 종리브 스캘럽부, 피로강도

KEYWORDS : orthotropic steel deck, deck plate, scallop of longitudinal rib, fatigue strength

1. 서론

강바닥판은 다른 바닥판에 비해 중량이 30~50% 정도밖에 되지 않아 장대교량에서 매우 유리한 구조이다(Troitsky, 1987). 따라서, 외국에서는 강바닥판을 이용한 교량의 시공 사례가 많고 국내에서도 다수의 강바닥판교가 시공 또는 계획되고 있다. 그러나, 강바닥판은 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 많은 양의 용접을 피할 수 없고, 이로 인한 용접 결함, 잔류응력, 면내 및 면외변형의 발생 등이 문제점으로 지적되고 있다(Fisher, 1996; Gurney,

1992). 영국이나 일본의 경우 초기 건설된 강바닥판 교량에서 피로균열 발생사례가 보고되고 있어 국내 강바닥판 교량에서도 교통량 증가 및 대형화로 인해 피로손상 가능성이 매우 높다고 볼 수 있다. 특히, 종리브 현장연결부는 구조상세가 매우 복잡하고, 그로 인해 피로에 취약한 구조를 갖고 있다.

大橋 등(1997)은 횡리브 및 종리브의 현장연결부의 스캘럽에서 최대응력이 발생하는 하중위치는 교축방향으로는 바로 위, 교축직각방향으로는 스캘럽 약간 바깥쪽인 것으로 조사하였다. 또한, 데크플레이트의 두께를 증가시키면 스캘럽부의 최대응력과 처짐량이 감소하고, 스캘럽의 길이를 120mm에

1) 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2) 학생회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

서 75mm로 감소시키면 최대응력의 감소량은 미미하나, 응력변동폭의 저감 효과가 뚜렷하다는 결과를 얻었다.

勝俣와 町田(1998)은 부재의 대형화, 단순화를 통한 용접연장의 감소 및 비용 절감에 목적을 둔 상세개량에 대해 연구하였다. 데크플레이트 두께가 현행 12mm에서 19mm로 증가시킬 경우, 시공성의 편의를 도모하기 위해 스캘럽의 교축방향 길이를 현행 100mm에서 120mm로 증가시키고, 스캘럽 반경을 30mm에서 35mm로 증가시켜도 피로상 문제가 없다고 서술하였다.

본 연구에서는 국내에 적용된 강바닥판 종리브 현장연결부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 또한, 수치매개변수해석을 통하여 스캘럽 길이, 데크플레이트 두께, 스캘럽 곡률반경 등이 종리브 현장연결부에 미치는 영향을 살펴보았다. 피로실험 결과로부터 피로균열진전양상을 살펴보고, 종리브 현장연결부에 대한 피로강도는 JSSC 시방규정과 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의한 피로강도와 비교검토하였다.

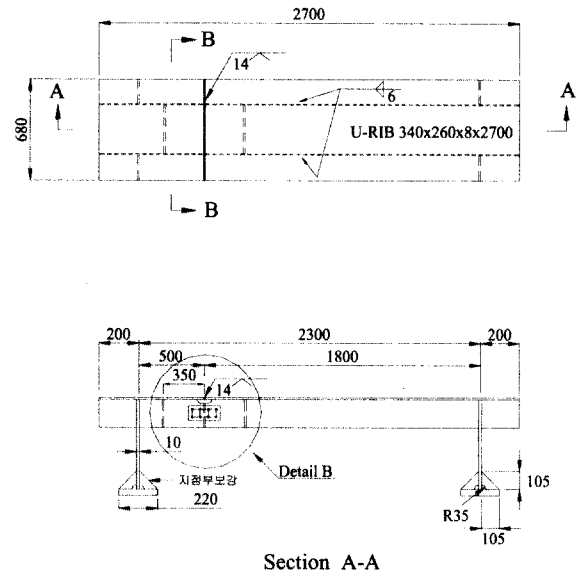
2. 실험개요

본 실험에서 대상으로 하는 강바닥판은 현재 가설중인 부산 광안대교의 재원을 사용하였다. 실교량에서의 강바닥판은 340×260×8-40의 종리브가 5개 부착된 폭 3500mm, 길이 7650mm의 바닥강판으로 용접되어 있으며, 횡리브의 간격은 약 2300mm이다.

본 실험에서는 강바닥판의 실제 거동을 가급적 유사하게 나타내기 위해 실험여건을 감안하여 종리브 및 횡리브의 크기와 연결부 형상을 동일하게 취하여 폭 680mm, 길이 2700mm의 실험체를 제작하였다. 본 실험에서 사용하는 강바닥판 실험체의 형상을 나타내면 그림 1과 같다. 시험체는 구조용 강재인 SM400 강재를 사용하였으며, 강재의 화학성분과 기계적 성질은 표 1과 같다.

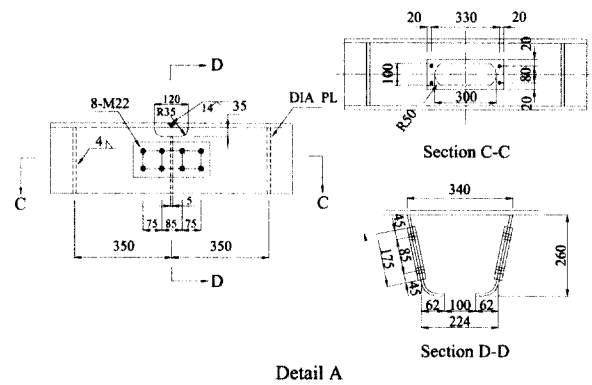
영향면 재하실험은 하중재하 위치를 교축방향으로 현장연결부 주위에는 50mm 간격으로 조밀하게 배치하였고, 현장연결부에서 멀어질수록 간격을 100~300mm로 증가시켜 모

두 18개의 구간으로 구분하였다. 그림 2에는 하중 중심점을 기준으로 영향면 재하시험의 위치를 나타내었다.



Section A-A

(a) 평면도 및 측면도



Detail A

(b) 세부단면도

그림 1. 강바닥판 실험체의 구조상세

표 1. SM400 강재의 화학성분 및 기계적 성질

구분	화학성분(%)					기계적성질		
	C	Si	Mn	P	S	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	신장율 (%)
데크플레이트	0.15	0.240	0.70	0.016	0.007	3,180	4,710	26
횡리브	0.16	0.12	0.70	0.019	0.009	3,360	4,630	25
종리브	0.14	0.240	0.58	0.016	0.006	2,940	4,120	28

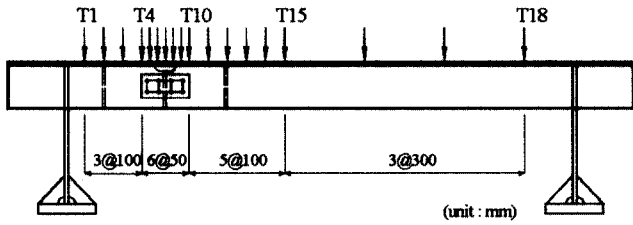


그림 2. 영향면 하중재하위치

정적재하실험 및 피로실험의 하중재하위치는 영향면재하 실험결과로부터 현장연결부 스캐럽부의 응력값이 최대가 되는 위치로서, 교축방향으로는 횡리브로부터 660mm 떨어진 위치, 교축직각방향으로는 실험체의 중앙에 하중재하판의 중심을 위치시켰다.

피로실험에서는 반복회수에 따른 각 측정위치의 응력변화를 체크하였으며, 균열발생 및 진전길이를 침투탐상액을 이용하여 육안으로 측정하였다. 재하하중은 일정 진폭하중으로 재하속도 1~2 Hz, 응력비 0.1 그리고 최대하중은 20~25tonf로 하여 매 50,000회마다 변형률을 측정하였다.

모든 실험에서 지점조건은 양쪽 횡리브를 구속하는 2지점계를 선택하였으며, 하중재하판의 크기는 도로교 표준시방서(1996)의 DB-24 트럭하중에 의한 차륜 접지면적을 사용하여 200×500mm²로 하였다.

3. 피로실험결과

피로실험에 대한 하중위치는 좌측횡리브에서 66cm 떨어진 위치로 정적실험과 동일하며, 균열은 실험체 I의 경우, 좌측스캐럽부와 데크플레이트 교차부의 데크플레이트측 용접지단부에서 발생하였으며, 실험체 II에서는 종리브웹에서 갑작스런 파괴가 발생하였다. 실험체별 피로실험결과를 나타내면 표 2와 같다. 실험체 I의 경우에는 약 73만회 정도에서 좌측스캐럽부와 데크플레이트 교차부의 데크플레이트측 용접지단부에서 약 8mm의 압축피로균열이 발생하였으며, 약 76만회에서는 반대면 같은 위치에서도 용접지단부 균열이 발견되었다. 그 후 약 230만회에서는 용접비드를 따라 진행하던 균열이 데크플레이트 안쪽으로 약 3mm 가량 진전하였으며, 실험종료시점인 430만회에서는 38mm 정도 진전하였다.

실험체 II에서는 약 4만회에서 실험체 I과 같은 위치에서 용접지단부균열이 발견되었다. 또한, 약 53만회에서는 핸드홀 덮개판에서도 피로균열이 발생하였으며, 약 56만회에서는 핸드홀 덮개판이 완전히 파손되었다. 그 후 약 111만회에서는

표 2. 실험체별 피로실험 결과

실험체 구분	하중크기 (tonf)	종료시 하중반복회수	균열발생위치
실험체 I	2~20	430만회	스캐럽부
실험체 II	2.5~25	111만회	스캐럽부, 덮개판, 연결부

종리브웹 볼트구멍에서 시작된 균열이 핸드홀 방향으로 갑작스런 파괴현상을 보여 피로실험을 중단하였다(최와 최, 2001).

그림 3은 실험체 I에서의 실제 균열양상을 보여주고 있으며, 종리브 양측 웹에 존재하는 스캐럽(좌측면(Left side), 우측면(Right side))에서 모두 균열이 발생하였다.

그림 3. 데크플레이트와 종리브 스캐럽부의 피로균열

4. 수치매개변수해석

4.1 유한요소해석 모델링

본 해석에서는 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였으며, 얇은 8절점 쉘요소를 사용하여 전체해석모델링을 실시하였다. 이때, 탄성계수는 $E = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$, 포아송비는 $\nu = 0.3$ 의 값을 사용하였다. 또한, 데크플레이트와 종리브 스캐럽부의 용접형상을 고려하기 위하여 3차원 솔리드 요소를 사용한 국부해석을 실시하였다. 그림 4에는 전체해석 모델을 나타내었으며, 그림 5에는 전체해석으로부터 얻은 변위조건을 이용하여 해석을 실시한 국부모델을 나타내었다.

그림 6에서와 같이, 본 해석에서는 현장연결부에 설치되는 스캐럽의 길이(L)와 곡률반경(R) 그리고 데크플레이트의 두께(T)를 매개변수로 선정하여 해석을 실시하였다. 이때, 스캐럽 길이는 75mm, 120mm, 150mm의 3가지 경우를,

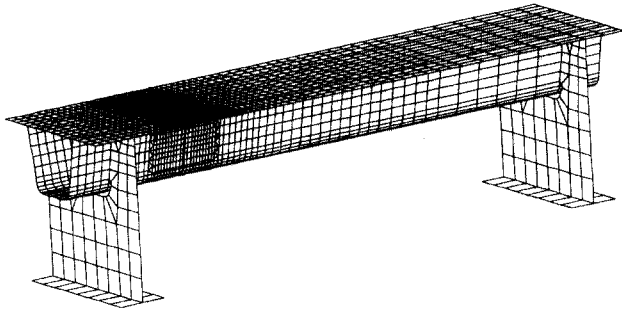


그림 4. 종리브 전체해석모델

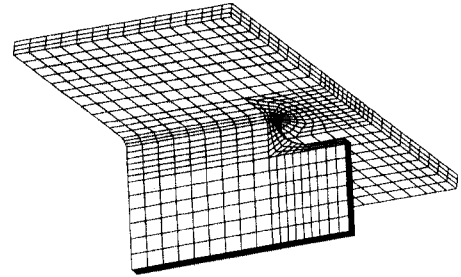


그림 5. 스킵 주위부에 대한 3차원 솔리드 국부해석모델

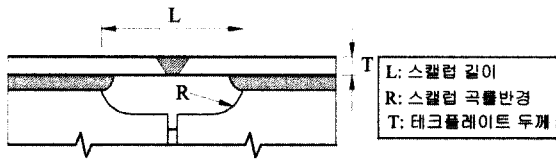
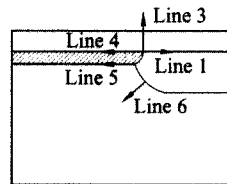
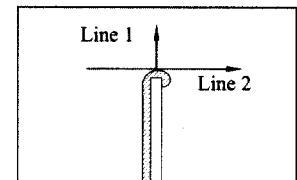


그림 6. 해석에 사용된 매개변수



(a) 측면



(b) 하면

그림 7. 각변수에 따른 응력산정위치와 방향

(a) Line 1

(b) Line 3

(c) Line 5

(d) Line 6

그림 8. 스킵의 길이변화에 따른 응력분포

스캐럽 곡률반경은 30mm와 35mm의 2가지 경우를, 그리고 데크플레이트 두께는 14mm, 19mm, 24mm의 3가지 경우에 대해 각각 비교, 검토하였다. 매개변수해석의 기본값은 시험체의 형상인 $L=120\text{mm}$, $R=35\text{mm}$, $T=14\text{mm}$ 로 하였다.

그림 7에는 각 매개변수에 대한 발생응력을 비교하기 위하여 선정된 위치와 방향을 나타내었다.

4.2 스캐럽 길이의 영향

그림 8에는 스캐럽의 길이(L)가 종리브 현장연결부의 응력분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 L 을 75mm, 120mm, 150mm로 변화시킨 결과를 나타내었다.

그림 8(a)와 (b)를 살펴보면, 스캐럽부의 데크플레이트 측(Line 1, Line 3)의 압축응력인 최소주응력 $S3$ 의 크기는 스캐럽 길이가 작을수록 크게 발생함을 알 수 있다. 한편, 인장

응력인 최대주응력 $S1$ 의 크기는 미소하므로 비교하지 않았다.

그림 8(c)와 (d)를 살펴보면, 스캐럽부의 종리브측(Line 5, Line 6)의 최대주응력 $S1$ 은 데크플레이트 측과는 달리 스캐럽 길이가 작을수록 발생응력도 작아짐을 알 수 있다. 한편, 최소주응력 $S3$ 의 크기는 미소하므로 비교하지 않았다.

피로실험 결과에서 나타난 것과 같이 피로균열은 스캐럽부 종리브측으로 발생하였으며, 그림 8에서와 같이 스캐럽 길이를 증가시키므로써 데크플레이트 측의 응력은 미소한 감소를 보이지만 종리브측의 응력은 증가함으로, 시공상 편의를 도모하기 위하여 스캐럽 길이를 증가시키는 것은 피로적인 측면에서는 불리한 결과를 주는 것으로 판단된다.

4.3 데크플레이트 두께의 영향

최근에 설계되고 있는 강바닥판 교량은 피로에 취약한 용접부를 줄이기 위해 부재를 대형화하는 추세에 있으며, 데크

(a) Line 3

(b) Line 4

(c) Line 5

(d) Line 6

그림 9. 데크플레이트의 두께변화에 따른 응력분포

플레이트의 경우도 그 두께가 기존에는 12~14mm였던 것을 19~28mm까지 증가시키는 방안에 대해 연구 및 시공되어지고 있다(勝俣와 町田, 1998).

그림 9에는 데크플레이트 두께가 종리브 현장연결부에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 데크플레이트의 두께를 14mm, 19mm, 24mm로 변화시킨 결과를 나타내었다.

그림 9(a)와 (b)는 용접지단부로부터 데크플레이트의 두께 방향과 종리브 방향의 응력분포를 비교한 것으로 두께변화에 따른 응력의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

스캐럽부의 종리브측 응력값을 비교한 그림 9(c)와 (d)를 살펴보면, 데크플레이트의 두께를 증가시킬수록 응력경감의 효과가 있음을 알 수 있다. 특히, 가장 큰 인장응력이 발생하는 Line 6에서는 데크플레이트 두께가 14mm에서 24mm로 늘어남에 따라 약 40%의 응력의 저감효과가 있음을 알 수 있다.

4.4 스캐럽 곡률반경의 영향

그림 10에는 스캐럽 곡률반경의 변화에 따른 종리브 현장 연결부의 발생응력의 변화를 살펴보기 위하여 곡률반경을 30mm, 35mm, 40mm로 변화시킨 결과를 나타내었다. 그림 10을 살펴보면, 데크플레이트 하면(Line 1, Line 2, Line 4)과 종리브측(Line 6) 모두에서 곡률반경이 커질수록 응력이 감소함을 알 수 있다.

5. 피로강도의 추정

본 연구에서는 종리브 현장연결부 스캐럽부를 노치로 간주하여 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의하여 곡률반경에 따른 피로강도를 추정하고 피로실험결과와 비교검토하였다.

(a) Line 1

(b) Line 2

(c) Line 4

(d) Line 6

그림 10. 스캐럽의 곡률반경변화에 따른 응력분포

노치부의 응력집중을 나타내는 무차원계수로서 피로노치계수(Fatigue notch factor) k_f 를 사용하였으며, 응력집중계수(Stress concentration factor) k_t 와 피로노치계수 k_f 는 노치민감도계수(Notch sensitivity factor) q 에 의하여 식 (1)과 같이 표현될 수 있다(Peterson, 1974).

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (1)$$

이때, q 는 노치형상에 지배되는 계수로서 식 (2)와 같이 정의된다.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{a}{\rho}} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 노치 선단의 곡률반경이고, a 는 재료상수로써 일반적인 구조용강에 대한 값인 $a=0.25\text{mm}$ 를 적용하였다(Dowling, 1999).

표 3에는 곡률반경에 따른 계산된 피로노치계수 k_f 를 나타내었다. Line 6의 시작점에서 공칭응력과 최대응력을 유한요소해석으로부터 구하고, 응력집중계수 $k_f (= \sigma_{\max}/\sigma_n)$ 을 산정하였다. 피로노치계수 k_f 는 식 (2)로부터 노치민감계수 q 를 구하여 식 (1)에 대입하므로써 얻어질 수 있다.

표 3. 피로강도 추정을 위한 각종 결과값 (응력단위: kgf/cm^2)

곡률반경 ρ	공칭응력 σ_n	최대응력 σ_{\max}	응력집중 계수 k_f	노치민감도 계수 q	피로노치 계수 k_f
30mm	65	240	3.692	0.9979	3.686
35mm	65	225	3.462	0.9982	3.456
40mm	65	220	3.385	0.9984	3.381

그림 11. 곡률반경에 따른 Shigley와 Juvinall에 의한 S-N 선도의 비교

Shigley와 Juvinall이 제안한 S-N선도 산정식은 식 (3)과 같다(Shigley와 Mischke, 1989; Juvinall과 Marshek, 1991).

$$\Delta S = AN_f^B \quad (10^3 \leq N_f \leq 10^6) \quad (3)$$

여기서, Shigley법에서는

$$A = \frac{(m')^2 \sigma_u k_f}{m}, \quad B = -\frac{1}{3} \log \frac{m' k_f}{m} \quad (4)$$

Juvinall법에서는

$$A = \frac{(m')^2 \sigma_u}{m k_f}, \quad B = -\frac{1}{3} \log \frac{m'}{m} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 여기서, σ_u 는 재료의 인장강도인 4120 kgf/cm^2 을 사용하였고, m, m' 은 부재의 재질, 표면처리, 하중종류, 부재치수 등과 관련된 감소계수이다(Dowling, 1999). Shigley법에서는 $m = 0.4215, m' = 0.9$, Juvinall법에서는 $m = 0.45, m' = 0.9$ 로 산정되었으며, 식 (3) ~ (5)으로부터 S-N선도를 얻을 수 있다.

그림 11에는 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의하여 종리브 현장연결부의 곡률반경이 30mm, 35mm, 40mm 일 때의 피로강도를 추정한 S-N선도를 나타내었다. 곡률반경이 30mm에서 35mm로 커짐에 따라 약 6%, 곡률반경이 35mm에서 40mm로 커질 경우엔 피로강도가 약 2% 향상되는 것을 알 수 있다.

그림 12에는 종리브 현장연결부에 대한 피로강도를 JSSC

그림 12. JSSC시방규정과 Shigley 및 Juvinall에 의한 S-N 선도와 피로실험 결과의 비교

시방규정 및 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의한 S-N선도와 비교하여 나타내었다. JSSC에서는 스캘럽을 포함한 용접이음에 대한 피로등급을 G등급으로 규정하고 있으며, 규정된 피로등급을 만족하는 것으로 판단된다. 그러나, 강바닥판 종리브 현장연결부에 대한 명확한 피로등급은 아직 마련되어 있지 않으며, 향후 충분한 피로실험데이터의 확보가 필요한 실정이다. Shigley가 제안한 방법에 의하여 예측된 S-N선도가 Juvinall이 제안한 방법보다 시방규정 및 실험결과치와 비교하여 볼 때 보다 타당성이 있음을 알 수 있다. 따라서, Shigley가 제안한 방법은 종리브 현장연결부에 대한 피로강도를 추정할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 국내에 적용된 강바닥판 종리브 현장연결부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 또한, 수치매개변수해석을 통하여 스캘럽 길이, 데크플레이트 두께, 스캘럽 곡률반경 등이 종리브 현장연결부의 응력분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 피로실험 결과로부터 피로균열진전양상을 살펴보고, 종리브 현장연결부에 대한 피로강도는 JSSC 시방규정과 Shigley와 Juvinall이 제안한 방법에 의한 피로강도와 비교검토했다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치매개변수해석 결과, 스캘럽 길이를 증가시킴으로써 데크플레이트 측의 응력은 미소한 감소를 보이지만 종리브측의 응력은 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 수치매개변수해석 결과, 데크플레이트 두께와 스캘럽의 곡률반경이 커질수록 응력의 감소가 미소하였다.
- (3) 피로강도추정 결과, 종리브 현장연결부는 규정된 JSSC피로등급을 만족하는 것으로 나타났으며, Shigley가 제안한 방법은 종리브 현장연결부에 대한 피로강도를 추정할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00484-0 (2002))지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Dowling, N. E. (1999), Mechanical Behavior of Materials, 2nd ed., Prentice Hill, pp. 444-451.
2. Fisher, J. W. (1996), "Full-scale Fatigue Test of the Williamsburg Bridge Orthotropic Deck," ASCE Structures Congress, Chicago, IL, Proceedings Vol. 1, pp. 329-336.
3. Gurney, T. (1992), Fatigue of Steel Bridge Decks, HMSO, London.
4. Juvinall, R. C. and Marshek, K. M. (1991), Fundamentals of Machine Component Design, 2nd ed., John Wiley, New York, NY.
5. Peterson, R. E. (1974), Stress Concentration Factors, John Wiley, New York, NY.
6. Shigley, J. E. and Mischke, C. R. (1989), Mechanical Engineering Design, 5th ed., McGraw-Hill, New York, NY.
7. Troitsky, M. S. (1987), Orthotropic Bridges - Theory and Design, 2nd ed., Published by the James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
8. 日本鋼構造協會 (1993), 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説, 技報堂出版.
9. 大橋治一, 藤井裕司, 村瀬佐太美 (1997), "鋼末版の疲勞を考慮したディテールの改良," 橋梁と基礎, 4月, pp. 31-36.
10. 大橋治一, 藤井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越潤 (1997), "鋼末版の現場継手近傍の局部應力と變形舉動," 日本土木學會論文集, 第 556号/ I-38, 1月, pp. 65-76.
11. 勝俣 盛, 町田文孝, (1998), "これからの鋼末版," 川田技報, Vol. 17.
12. 최동호, 최항용 (2001), "강바닥판 종리브 현장연결부의 실험적 거동 특성," 한국강구조학회 논문집, 제13권 6호, pp. 621-629.

(접수일자 : 2002년 7월 12일)