강상판 종리브 현장연결부의 실험적 거동 특성

An Experimental Study on Behavior of Field Splice Joints of Longitudinal Rib in Orthotropic Steel Decks

최 동 호[1] · 최 항 용[2]

Choi, Dong Ho Choi, Hang Yong

요 약 : 본 연구에서는 국내에 적용된 강상판 종리브 현장연결부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 정적 및 영향면 재하실험을 통하여 강상판 현장연결부의 응력분포양상을 분석하여 핸드홀 덮개판의 유무와 편심하중의 영향을 살펴보았다. 극한강도 실험을 통해서는 종리브 현장연결부의 극한내력을 평가하였다. 피로실험을 수행한 결과, 낮은 응력수준에서는 스캘럽부에서 피로균열이 발생하였고, 높은 응력수준에서는 핸드홀 덮개판의 파괴 후에 종리브의 갑작스런 파괴가 일어났다. 본 연구를 통하여 현장연결부의 거동특성의 이해를 위한 기초적 연구를 수행하였다.

ABSTRACT : This study consists of static and fatigue tests to evaluate the behavior on the field splice joint of longitudinal rib in orthotropic steel deck specimens. Specifically, static and influence surface tests are performed for the stress distribution at the scallop area and high-strength bolt connection of longitudinal rib to examine the existence of handhole cover plate and the effect of eccentric loads. The ultimate strength of the field splice joint of longitudinal rib is obtained. In fatigue tests, cracks are observed at the scallop in the lower level test and the catastrophic failure of longitudinal rib is occurred following the failure of handhole cover plate in the higher level test. This study gives a basis for the better understanding of the field splice joint of longitudinal rib.

핵 심 용 어 : 강상판, 현장연결부, 스캘럽, 핸드홀, 덮개판

KEYWORDS : orthotropic steel deck, field splice joint, scallop, handhole, cover plate

1) 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2) 학생회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

강도로교에서 강상판은 철근콘크리트 상판에 비해 단위면적당 약 30~50% 이상의 사하중이 절감되고, 시공시 공기절감도 기대된다(Troitsky, 1987). 따라서, 강상판은 사하중 절감이 절실히 요구되는 장대교량에 있어서 매우 유리한 구조를 가지기 때문에 외국에서는 강상판을 이용한 교량의 시공 사례가 많고 국내에서도 다수의 강상판 교가 시공 또는 계획되고 있다. 그러나, 강상판은 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). 이러한 요인은 결국 강상판의 피로강도를 저하시키는 결과를 초래한다. 영국이나 일본의 경우 초기 건설된 강상판 교량에서 피로균열 발생사례가 보고되고 있어 국내 강상판 교량에서도 교통량 증가 및 대형화로 인해 피로손상 가능성이 매우 높다고 볼 수 있다. 특히, 현장연결부는 시공상의 이유로 구조상세가 매우 복잡하고, 그로 인해 피로에 취약한 구조를 갖고 있다.

Gurney(1992)는 데크플레이트의 현장연결부를 교축방향과 평행한 종방향 용접과 수직인 용접으로 나누어 연구하였다. 그 결과, 종방향 용접의 경우 가용접(tack weld)이 않된 뒷받침판 상에 홈용접을 하고, 필렛용접을 연속적으로 자동용접한 경우가 피로강도가 가장 좋으며, 횡방향용접의 경우 데크플레이트의 두께를 증가시킬수록 응력집중이 크게 발생하여 피로강도는 감소한다는 것을 확인하였다.

三木 등(1997)은 횡리브 및 종리브의 현장볼트연결부의 스캘럽에서 최대응력이 발생하는 하중위치는 교축방향으로는 바로 위, 교축직각방향으로는 스캘럽 약간 바깥쪽인 것으로 조사하였다. 또한, 데크플레이트의 두께를 증가시키면 스캘럽부의 최대응력과 처짐량이 감소하고, 스캘럽의 길이를 120mm에서 75mm로 감소시키면 최대응력의 감소량은 미미하나, 응력변동폭의 저감 효과가 뚜렷하다는 결과를 얻었다.

勝俣 등(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 강상판 종리브 현장연결부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 정적 및 영향면 재하실험을 통하여 강상판 현장연결부의 응력분포양상을 분석하여 핸드홀 덮개판의 유무와 편심하중의 영향을 살펴보았으며, 극한강도 실험을 통해서는 종리브 현장연결부의 극한내력을 평가하였다. 또한, 피로실험의 결과를 통하여 피로균열양상을 살펴보고, 강상판 현장연결부에 대한 피로강도 향상과 피로평가를 하였다.

2. 실험개요

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

본 실험에서는 강상판의 실제 거동을 가급적 유사하게 나타내기 위해 실험여건을 감안하여 종리브 및 횡리브의 크기 및 연결부 형상을 동일하게 취하여 폭 680mm, 길이 2700mm의 실험체를 제작하였다. 본 실험에서 사용하는 강상판 실험체의 형상을 나타내면 그림 2.1과 같다.

영향면 재하실험은 하중재하 위치를 교축방향과 교축직각방향으로 나누어 실시하였다. 교축방향으로 현장연결부 주위에는 50mm 간격으로 조밀하

게 배치하였고, 현장연결부에서 멀어질수록 간격을 100~300mm로 증가시켜 모두 18개의 구간으로 구분하였다. 교축직각방향으로는 실험체 중앙으로부터 좌우 45mm 간격으로 모두 5개의 구간으로 구분하여 총 90개의 측정점을 선정하여 1 tonf의 하중을 각 측정위치마다 옮겨가면서 측정하였다.

정적재하실험 및 피로실험의 하중재하위치는 영향면재하 실험결과로부터 현장연결부 스캘럽부의 응력값이 최대가 되는 위치로서, 교축방향으로는 횡리브로부터 660mm 떨어진 위치, 교축직각방향으로는 실험체의 중앙에 하중재하판의 중심을 위치시켰다. 정적재하실험은 피로실험시 재하하중의 크기를 결정하기 위한 실험과 현장연결부의 극한강도를 알아보기 위한 실험으로 나누어 실시하였다.

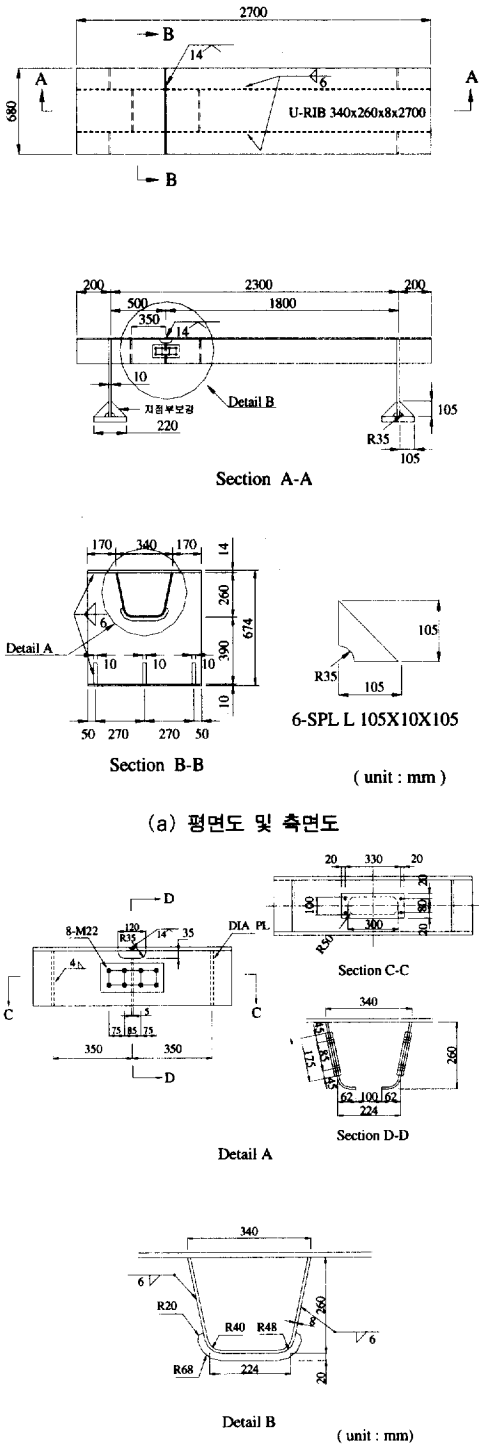
피로실험에서는 반복회수에 따른 각 측정위치의 응력변화를 체크하였으며, 균열발생 및 진전길이를 침투탐상액을 이용하여 육안으로 측정하였다. 재하하중은 일정 진폭하중으로 재하속도 1~2 Hz, 응력비 0.1 그리고 최대하중은 20~25tonf로 하여 매 50,000회마다 변형률을 측정하였다.

모든 실험에서 지점조건은 양쪽 횡리브를 구속하는 2지점계를 선택하였으며, 하중 재하판의 크기는 피로설계시 고려되는 하중 크기인 200×500mm^{2}로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 영향면재하실험에 따른 응력분포

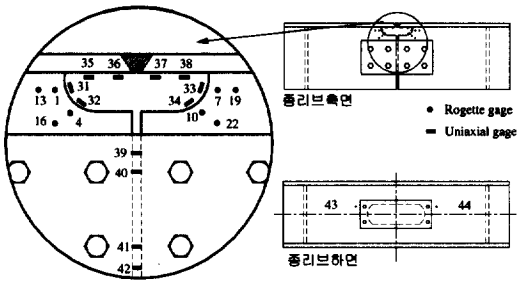
영향면재하실험 및 피로실험에 사용된 게이지 부착위치는 단면이 급변하여 응력집중이 예상되는 스캘럽부 주위에 중점을 두고 부착하였으며, 하중재하점 바로 아래에서는 바닥강판의 변형이 상대적으로 크기 때문에 균열의 발생가능성이 높아 이 위치에도 게이지를 부착하였다. 본 실험에서 사용된 대표적인 게이지 부착위치를 나타내면



(a) 평면도 및 측면도

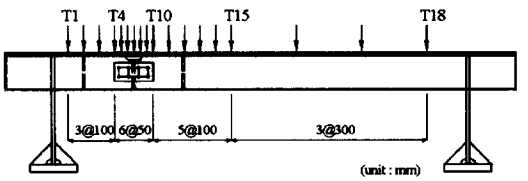
(b) 세부단면도

그림 2.1 강상판 실험체의 구조상세

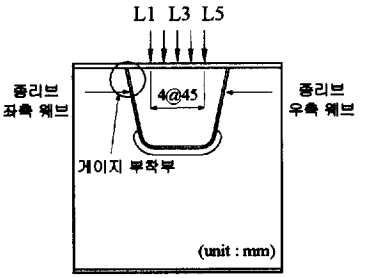


게이지위치 31, 32, 33, 34는 스캘럽부 종리브 두께면에 부착하였음
게이지위치 35, 36, 37, 38은 종리브 웨브 바로위 데크플레이트 하면에 부착하였음

그림 3.1 게이지 부착위치



(a) 교축방향



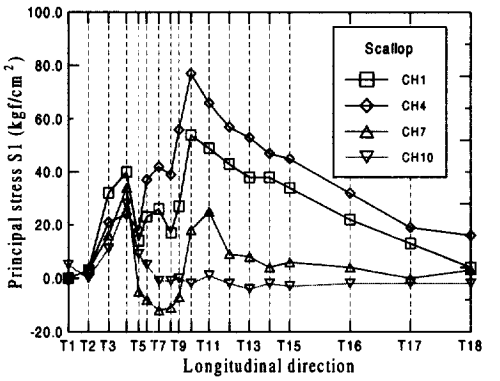
(b) 교축직각방향

그림 3.2 영향면 하중재하위치

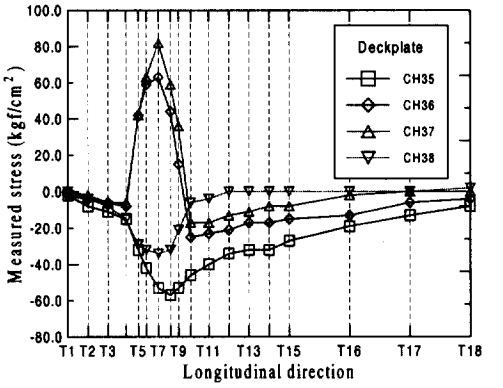
그림 3.1과 같으며, 영향면 재하시험 위치는 그림 3.2와 같다.

종리브 현장연결부의 부위별 최대주응력의 영향선을 나타내면 그림 3.3과 같다. 그림 3.3(a)에서 재하위치에 상관없이 종리브 스캘럽부에서는 주로 인장응력이 발생함을 알 수 있고, 횡리브로부터 66cm 떨어진 T10 위치에 하중재하시 게이지 CH4 위치에서 최대인장응력이 발생함을 알 수 있다.

그림 3.3(b)에서 데크플레이트측 스캘럽 끝단에 위치한 CH35, CH38은 재하위치에 관계없이



(a) 스캘럽 주변부



(b) 데크플레이트 하면

그림 3.3 교축방향응력의 영향선

압축응력상태이고, 데크플레이트 용접연결부 근처에 위치한 CH36, CH37에서는 하중이 용접부에 직접 재하되는 T5~T9에서 높은 인장응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

3.2 핸드홀 덮개판 유무(有無)에 따른 영향

종리브의 현장연결시에는 종리브 하면에 고장력 볼트의 체결과 현장용접시 뒷받침판 및 기자재류의 삽입 그리고 환기구로서 핸드홀이 필요하다. 그러나, 실제 공용기간 중에는 해수 및 조류 등의 침입에 의한 노폐물 축적에 따른 부식 등을 고려하여 핸드홀을 덮개판으로 폐쇄하는 경우가 있다. 이러한 핸드홀 덮개판 유무가 현장연결부에 미치

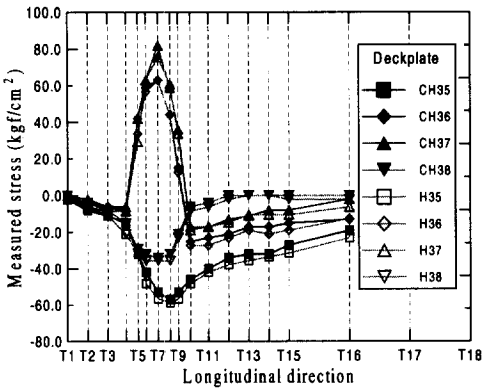


그림 3.4 덮개판 유무에 따른 교축방향응력의 영향선
(■ ◆ : 덮개판 유(CH), □ ◇ : 덮개판 무(H))

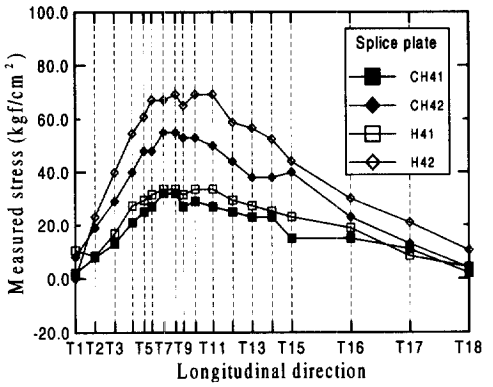
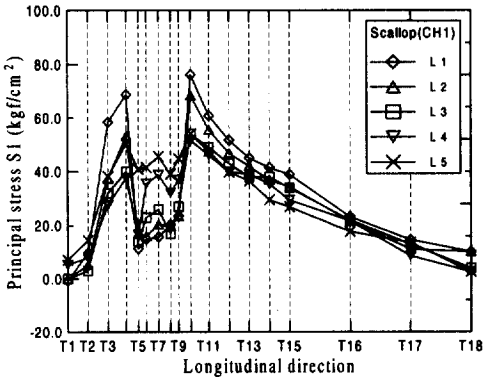


그림 3.5 종리브연결부의 영향선 비교
(■ ◆ : 덮개판 유(CH), □ ◇ : 덮개판 무(H))

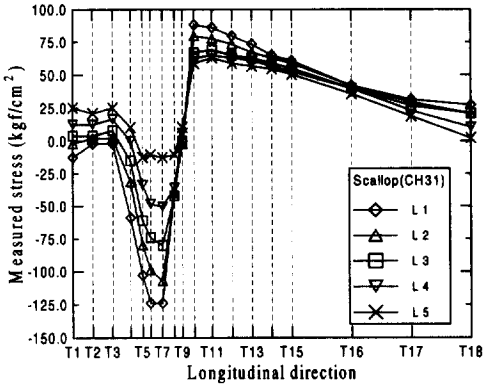
는 영향을 살펴보았다. 그림 3.4에서는 핸드홀 덮개판의 유무에 따라 데크플레이트 연결부에 발생하는 응력의 차이가 미소함을 보여주며, 그림 3.5에서는 핸드홀 덮개판의 유무에 따른 종리브 연결부에 발생하는 응력은 덮개판을 설치한 경우 최대 약 30%정도의 응력 경감이 발생함을 보였다.

3.3 편심하중의 영향

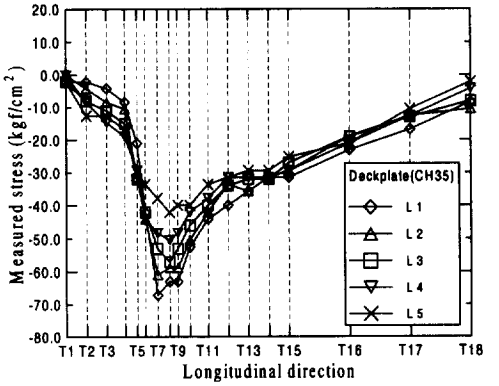
그림 3.2(b)에서와 같이, 종리브 중앙이 아닌 위치에서 하중재하시 교축직각방향으로 편심하중의 영향을 살펴보기 위하여 중심에서 좌우측으로 45mm씩 이동하여 하중재하를 실시하였다. 한



(a) 스캘럽부 종리브 연단 CH1위치



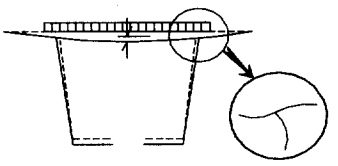
(b) 스캘럽부 종리브 두께면 CH31위치



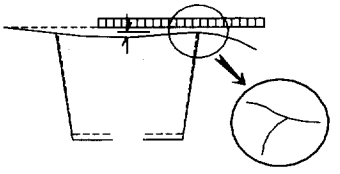
(c) 데크플레이트측 스캘럽 끝단 CH35위치

그림 3.6 편심하중에 따른 응력분포

편, 종리브 좌측웨브 스캘럽부에 게이지를 부착하였다. 그림 3.6(a), (b), (c)에서는 스캘럽부에



(a) 종리브중앙재하시



(b) 편심재하시

그림 3.7 데크플레이트 및 종리브웨브의 면외변형

서의 편심하중으로 인한 주응력의 영향선 분포를 나타내었고, 편심하중으로 응력의 증가가 있음을 보여주고 있다. 그림 3.7에서는 교축직각방향 단면에서 종리브 중앙 하중재하시와 편심하중재하시에 데크플레이트와 종리브 웨브 연결부의 면외거동을 그림으로 나타내었다. 그림 3.7에서와 같이, 교축직각방향의 국부재하에 의해 종리브 웨브와 데크플레이트에서는 면외변형이 발생하고 이로 인하여 응력상태가 달라짐을 그림 3.6에서 확인되었다.

3.4 종리브 연결부의 극한강도

본 연구에서는 강상판의 고장력볼트 연결부의 강도에 착안하여 정적재하실험을 수행하였으며, 그림 3.8은 실험에서 얻어진 하중변위곡선을 표시하고 있다. 하중 약 3~5tonf에서 비선형거동을 보이고 약 50tonf까지 선형거동을 보였으며, 약 53tonf 정도에서 종리브하단부의 핸드홀 덮개판의 파단과 함께 실험체가 파괴되었다.

그림 3.9는 극한강도실험에 의한 실험체의 파단양상을 보여주고 있다. 실험 종료 후 종리브 웨브의 고장력볼트 연결판을 제거하여 모재의 파단을 관측한 결과, 고장력볼트 연결부의 파괴는 지압파괴(볼트구멍의 확대)와 전단파괴(종리브측면

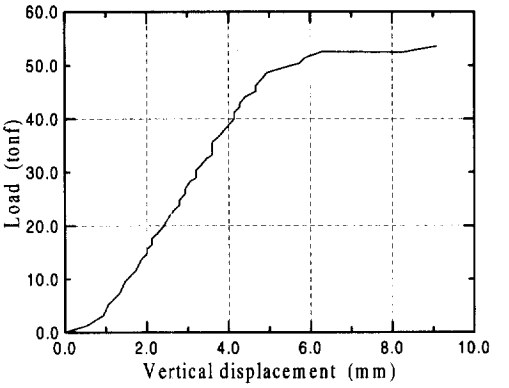
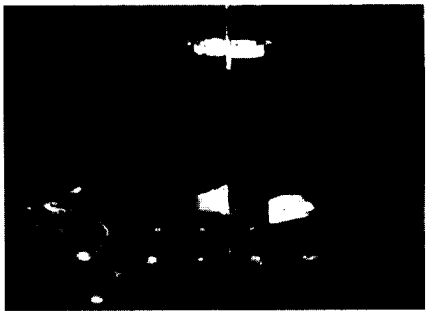
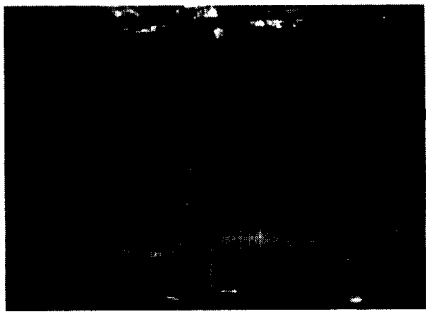


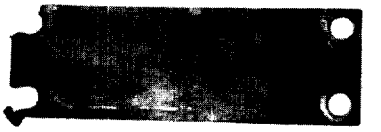
그림 3.8 하중변위곡선



(a) 종리브 좌측웨브



(b) 종리브 우측웨브



(c) 덮개판

그림 3.9 극한강도실험에 의한 실험체의 종리브 연결부 파손상태

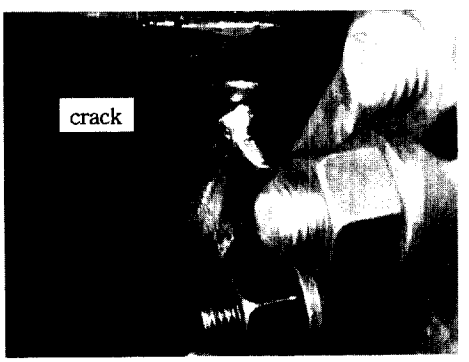
하부 볼트구멍의 파괴) 및 인장파괴(종리브측면 상하 볼트구멍 사이의 파괴)가 혼합된 양상을 보임을 확인하였다.

3.5 피로실험

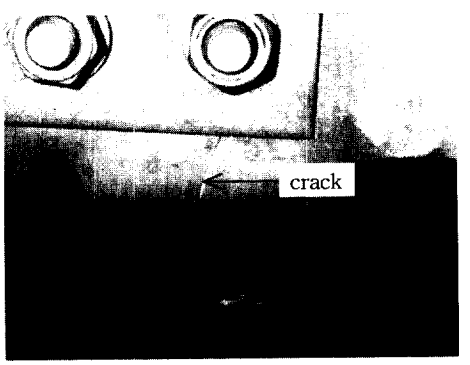
피로실험에 대한 하중위치는 좌측횡리브에서 66cm 떨어진 위치로 정적실험과 동일하며, 균열은 실험체 I 의 경우, 좌측스캘럽부와 데크플레이트 교차부의 데크플레이트측 용접지단부에서 발생하였으며, 실험체 II에서는 종리브웨브에서 갑작스런 파괴가 발생하였다. 실험체별 피로실험결과를 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 실험체별 피로실험 결과

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



(a) 스캘럽부의 피로균열



(b) 연결부의 피로균열

그림 3.10 종리브 현장연결부의 피로균열

실험체 I 의 경우에는 약 73만회 정도에서 좌측 스캘럽부와 데크플레이트 교차부의 데크플레이트측 용접지단부에서 약 8mm의 압축피로균열이 발생하였으며, 약 76만회에서는 반대면 같은 위치에서도 용접지단부 균열이 발견되었다. 그후 약 230만회에서는 용접비드를 따라 진행하던 균열이 데크플레이트 안쪽으로 약 3mm 가량 진전하였으며, 실험종료시점인 430만회에서는 38mm 정도 진전하였다.

실험체 II에서는 약 4만회에서 실험체 I 과 같은 위치에서 용접지단부균열이 발견되었다. 또한, 약 53만회에서는 핸드홀 덮개판에서도 피로균열이 발생하였으며, 약 56만회에서는 핸드홀 덮개판이 완전히 파손되었다. 그후 약 111만회에서는 종리브웨브 볼트구멍에서 시작된 균열이 핸드홀 방향으로 갑작스런 파괴현상을 보여 피로실험을 중단하였다.

그림 3.10은 실험체 I, II에서의 실제 균열양상을 보여주고 있으며, 그림 3.11은 실험체 I 에 대한 반복횟수에 따른 균열진전량을 표시하고 있다. 종리브 양측 웨브에 존재하는 스캘럽(좌측면(Left side), 우측면(Right side))에서 모두 균열이 발생하였다. 그림 3.11에서와 같이, 피로균

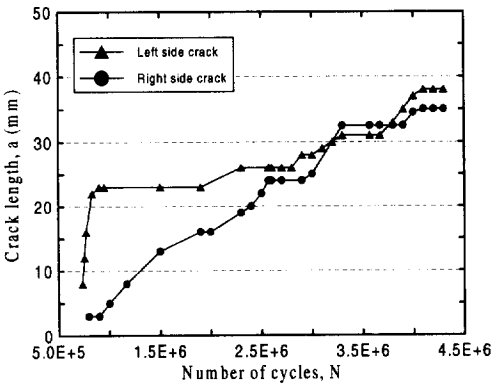


그림 3.11 종리브 연결부 스캘럽부의 피로균열 a-N선도

열이 발생한 양쪽 스캘럽부의 용접연결부는 용접처리상태에 따라 초기균열의 발생시키가 다를 수 있으며, 어떤 피로균열의 크기에 도달한 후에는 균열진전속도가 유사해짐을 알 수 있다.

균열발생부에 대한 주응력의 분포 및 크기를 정량적으로 살펴보기 위하여 정적재하실험에 의한 주응력의 크기 및 방향을 도시하면 그림 3.12와 같으며, 이때 주응력은 시험체 I과 시험체 II의 실험결과를 평균하여 산정하였다.

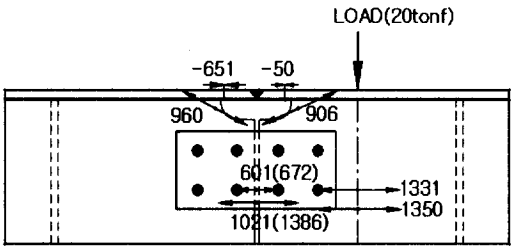


그림 3.12 종리브 연결부의 주응력의 크기 및 방향

그림 3.12를 살펴보면, 스캘럽부와 데크플레이트 교차부의 데크플레이트측 용접지단부에서 발생한 피로균열의 경우에는 데크플레이트측에 압축응력상태에 있음을 알 수 있으며, 용접지단부의 응력집중에 의하여 균열이 빠르게 발생한 것으로 보이나 균열의 진전속도는 미소함을 알 수 있다. 종리브연결부 중앙하단에서의 응력값의 괄호값은 핸드홀의 덮개판이 제거될 때의 응력값을 표시하고 있으며, 덮개판의 파손에 의하여 종리브하면에 약 30%의 응력이 증대되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 실험체II의 종리브웨브의 균열은 덮개판의 파손에 의한 종리브하면의 응력증대로 인한 영향으로 보이며, 핸드홀에 덮개판을 설치할 경우에는 덮개판에 대한 충분한 강도의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에 적용된 강상판 현장연결부의 구조상세를 검토하고 실험체를 제작하여 정적재하실험 및 피로실험을 실시하였다. 그 결과 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 영향면재하실험 결과, 종리브 현장연결부에서 응력이 가장 크게 발생하는 하중재하위치는 좌측횡리브로부터 66cm 떨어진 위치이며, 종리브 현장연결부의 상부 스캘럽부에서 최대응력이 발생하였다.

(2) 강상판 현장연결부의 핸드홀에 덮개판을 설치할 경우, 스캘럽부와 종리브 고장력볼트 연결부에는 약 30%의 응력경감효과를 기대할 수 있다.

(3) 교축방향으로 하중을 편심재하할 경우, 스캘럽부에서의 응력상태가 압축에서 인장으로 교차하는 현상을 보였으며, 이는 편심재하에 의해 국부적으로 발생하는 횡방향 면외변형에 기인하는 것으로 판단된다.

(4) 종리브 현장연결부의 극한강도 실험결과, 볼트의 미끌림현상과 함께 하중 약 53 tonf 정도에서 실험체가 파괴되었으며, 내측 볼트구멍에서는 지압파괴, 외측 볼트구멍에서는 전단파괴 양상을 보였다.

(5) 피로실험결과, 핸드홀 덮개판의 파손과 더불어 종리브웨브에 균열이 발생하여 파단되었으며, 핸드홀 덮개판을 설치할 경우에는 충분한 강도의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. American Institute of Steel Construction (1963), *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges.*

2. Troitsky, M. S. (1987), *Orthotropic Bridges - Theory and Design*, 2nd ed., Published by the James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
3. Gurney, T. (1992), *Fatigue of Steel Bridge Decks*, HMSO, London.
4. 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.
5. Dowling, N. E. (1999), *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed., Prentice Hill.
6. 大橋治一, 藤井裕司, 村瀬佐太美 (1997), "鋼床版の疲勞を考慮したディテールの改良," *橋梁と基礎*, 4月.
7. 大橋治一, 藤井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越潤 (1997), "鋼床版の現場継手近傍の局部應力と變形擧動," *日本土木學會論文集*, 第 556号/I-38, 1月.

(접수일자 : 2001년 7월 13일)