

I 형강 격자 상판의 주부재 I형강에 대한 해석적 연구

Analytical Study on I-beam of I-beam Grated Concrete slab

박 창 규*
Park, Chang Gyu

김 용 곤**
Kim, Yong Gon

정 영 수***
Chung, Young Soo

ABSTRACT

Recently, there have been increased much concerns about repair and rehabilitation works for aged concrete structures. In particular, it is known that due to repeated overburden vehicle there are significantly increasing number of aged concrete bridge slabs, which are strongly needed to construct and rehabilitate by innovative construction method.

The objective of this research is to develop the new construction method of concrete slab in bridge structure, which can contribute to minimize the traffic congestion during the repair and rehabilitation works of aged concrete slab, and can also sufficiently assure the quality through the minimization of in-situ works at the site. I-beams with punch holes, which are substituted instead of main reinforcing steels in concrete slabs, will be manufactured in accordance with the specification in the factory, and will be preassembled into the panel. After erecting the preassembled panels in the site, concrete will be poured into the slab panel.

This research is to investigate physical properties of I-Beam with punch holes itself through static and fatigue test with rational numerical analysis.

Finally, this research is to suggest reformed I-beam through the numerical analysis.

1. 서 론

사회 간접자본 시설 중에 주요 구조물중의 하나인 교량은 구조설계의 오류와 시공결함, 공용 기간동안 환경조건의 변화에 따른 열화현상, 무분별한 초과하중 등의 여러 가지 요인에 의해 성능이 저하되고 구조물의 수명이 단축되며 안정성이 저하되게 된다. 또한 최근 교량상의 통과하중의 증대 및 교통량 폭증으로 공용중의 상판교량은 가혹한 하중하에서 국부파괴가 발생하여 이에 대한 유지보수 비용의 증가와 교통통제로 인한 물류비용의 폭증, 국민생활의 불편 등 사용상에 중대한 문제를 야기시키고 있다.

이는 상판의 보수 혹은 교체공사등을 증가시키어, 보다 신속하고 부분교체로 교통통제를 완화할 수 있

* 정회원, 중앙대학교 대학원 지구환경시스템공학과 석사과정

** 정회원, 한경대 이공학부 안전공학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

으며, 또한 품질에 신뢰성이 있는 상판공법이 필요하게 되었다. 이러한 연유로 그림 1에 나타난 바와 같은 형식인 강·콘크리트 합성상판으로 주철근을 대신하여 I형강을 사용하고, 배력근으로써 기존 철근을 사용하며, 거푸집대용으로 아연저판을 사용한 이른바, I형강 합성바닥판으로서 국내 여건에 맞는 상판공법을 위하여 실험 및 해석을 통한 연구를 수행하게 되었다. 한편, 주철근 대용의 I형강의 경우 국산품이 없는 실정이므로 본 연구에서는 일본에서 사용하고 있는 I형강을 변형한 국내실정에 맞는 I형강을 설계 제작하였다. 제작된 시험편은 정적 및 피로시험을 수행한 후 각종 실험결과를 분석하여, 설계 및 시공 지침서의 제시와 I형강의 국산화와 개발된 I형강 합성 바닥판의 국내교량에서의 적극적인 활용방안을 모색하고자 한다.

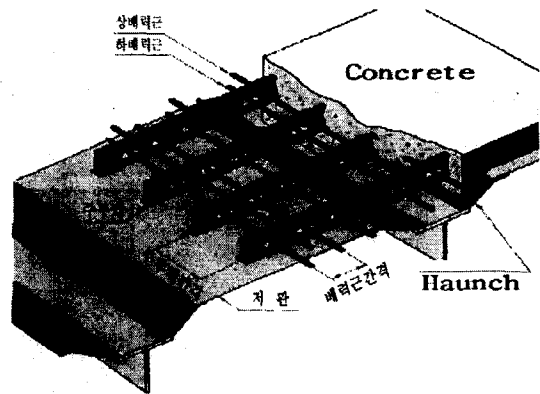


그림 1 I형강 슬래브의 주요구조

2. 연구목적

본 연구는 기존 주부재 I형강 실험에서 Web 내부의 Punch Hole 형상(반원형, 삼각형)에 따라 정적 성능에 차이가 생기고, 또한 정적성능이 떨어지는 반원형 형상이 피로성능이 우수하게 나타난 결과를 수치 해석을 통하여 이를 입증하고, 이를 바탕으로 수치해석을 이용하여 정적성능 및 피로성능이 우수한 개량된 주부재 I형강을 제시하고자 한다.

3. 주부재 I형강 실험⁽¹⁾

3.1 실험내용

주부재 I형강의 재질은 제작상 용접이 불가피하여 일반 구조용 강재 SS400과 허용응력과 항복응력이 동일한 SWS400으로 정하여 제작하였다.

본 연구의 대상 모델은 I형강의 단면치수는 동일하나 Web 내부의 Punch Hole 형상(반원형, 삼각형)에 따른 주부재의 성능을 파악하기 위하여 실험은 정적실험과 피로실험으로 수행하였다.

시험체의 구조제원은 다음 그림 2, 그림 3과 같다.

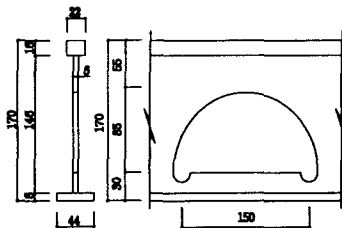


그림 2 I-170SC 시험체

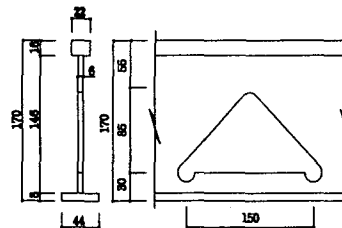


그림 3 I-170ST 시험체

3.1.1 정적 재하실험

정적 재하실험은 단순 지지된 길이 2,400mm(경간거리2,200mm)의 시험체 중앙에 선하중(Line load)형태로 재하속도 25kgf/sec로 3.0tonf까지는 하중제어(Force control)로 재하하고, 3.0tonf부터 파괴시까지의 변위제어로 수행하였다.

3.1.2 I-170형강(2열) 시험체의 피로시험

시험체는 I형강 Web의 Punch Hole 형상에 따른 피로성능을 비교하기 위하여 시험체 중앙에서 좌측은 삼각형 형상을, 우측은 반원형 형상으로 제작하고, 대칭으로 2열을 배치하였고, Punch hole 우각부로 전달되는 용접영향을 배제하기 위하여 배력근은 배근하지 않았다.

정적 재하시험과 마찬가지로 단순 지지된 경간거리 2,200mm의 피로시험체 중앙에 선하중(Line load)으로 재하하였다. 재하하중 최대값(P_{max})은 항복하중(P_y)의 75%인 4.5tonf으로 결정하였고, 최소값(P_{min})은 항복하중(P_y)의 10%인 0.6tonf으로 설정하였으며, 재하속도는 2.5Hz에서 시험체 파단시까지 반복 재하하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 정적 실험결과

실험수행결과 시험체는 항복시까지의 휨거동을 한 후 파괴는 제작변형과 편심하중으로 인한 Lateral Buckling으로 파괴되었다. 실험 결과는 항복위치는 두 시험체 모두 하부 플랜지가 아닌 Punch Hole하단의 우각부 위치에서 항복하였으며, 정적 및 파괴하중은 단면 Loss가 적은 I-170ST 부재가 다소 크게 나타났다.

표 1 정적 실험 결과

| | I-170SC | I-170ST |
|--------|----------|----------|
| 항복하중 | 3.0 tonf | 3.5 tonf |
| 파괴하중 | 3.7 tonf | 4.4 tonf |
| 항복시 변위 | 7.7 mm | 8.7 mm |

3.2.2 피로 실험 결과

I-170FM의 경우 실험초기에는 양부재에서 정적실험과 동일하게 Punch Hole형상으로 인하여 단면 Loss가 큰 반원형에서 변형률이 다소 크게 나타났다. 그림 4에서 보는 바와 같이 삼각형 단면의 경우 비탄성구간이 짧은 것에 비하여, 반원형 단면의 경우 탄성영역에서 높은 변형률에도 불구하고 상당히 긴 비탄성구간을 갖는 특징을 나타내고 있다. 피로횟수가 누적됨에 따라 반원형 Hole보다 삼각형 Hole의 변형률이 크게 증가하여, 삼각형 Hole 하부에서 먼저 항복을 나타내었고 균열도 먼저 발생하였다. 그 후 하부플랜지 파단으로 부재가 파괴되어 실험을 종료하였다. 따라서 반원형이 정적강도는 다소 떨어지나 피로 성능은 우수한 것으로 나타났다.

그림 4의 "A"에서 나타난 변형률의 저하는 국부좌굴의 영향 및 지점 변위의 영향으로 판단되어 진다.

표 2 피로 실험결과 (x10³)

| 재하횟수 | 항복시 | 균열발생시 | 파괴시 |
|------|-----|-------|-----|
| 삼각형 | 32만 | 34만 | 47만 |
| 반원형 | 42만 | 43만 | |

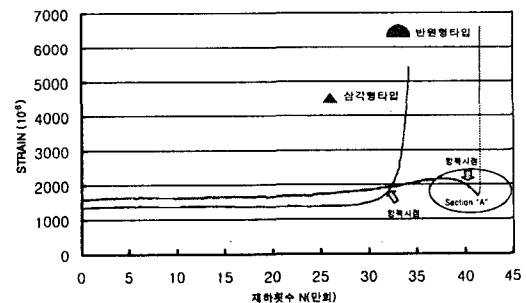


그림 4 피로실험체의 변형률 곡선

4. 주부재 I형강의 수치해석

4.1 해석 모델링

본 연구의 구조해석을 위한 대상 구조물은 실험과 동일하게 Punch Hole형상이 삼각형인 I-170ST와 반원형인 I-170SC이며, 각각의 모델은 실제 I형강에서 2개의 Punch Hole을 포함한 모델이다.

모델링은 평면 등매개변수(Isoparametric Element)를 사용하여 I형강 일반 단면에 대해서는 4절점요소를 사용하였고, Punch Hole 주변에서는 단면형상의 변화에 따라 우각부에 발생하는 응력의 크기를 비교하고자 가능한 단면형상 유지에 주의를 기하여 9절점 요소로 모델링 하였다.

본 해석에서 Boundary Condition은 실험과 동일한 조건인 Simple Support를 적용하였고, Element Type은 Plane Stress로 해석하였다.

그리고 본 해석에서는 정적 성능 검토를 위하여 탄성 영역 내에 선형거동을 고려하여 임의의 단위 하중으로 100kgf를 재하하여 최대응력이 발생하는 위치를 파악하여 정적실험에서 나타난 항복점 위치와 비교하였다.

또한, Punch Hole 형상에 따른 Hole 주변의 절점에서 발생하는 응력값으로 응력집중계수를 구하여 피로성능을 비교하였다.

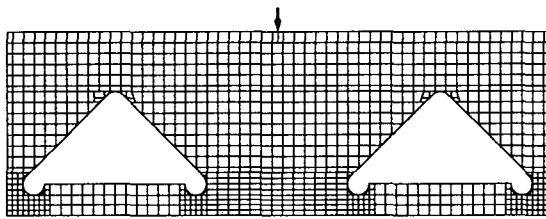


그림 5 I-170ST 모델

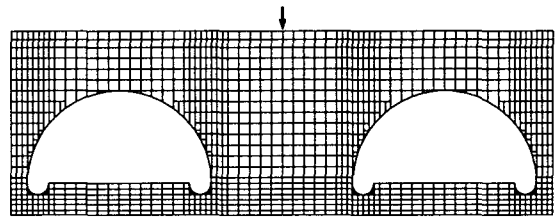


그림 6 I-170SC 해석모델

4.2 해석 결과

본 해석에서 사용한 모델을 이용하여 단위하중 100kgf에 대한 해석결과는 표 3과 같이 최대응력 발생점은 정적실험결과와 동일하게 부재 중앙 단면의 하단이 아닌 Web hole 하단의 외측 우각부 위치에서 최대 응력이 발생하였으며, 세 부재의 Stress값 또한 실험결과와 동일하게 단면 Loss가 적은 I-170ST 부재의 응력이 작게 나타났다.

표 3 해석 결과

| 모델명 | Max Stress (kgf/cm ²) | Max Stress 발생위치 |
|---------|--------------------------------------|--------------------|
| I-170ST | 253 | 우측우각부 하단 |
| I-170SC | 293 | " |

또한, 정적 재하 능력이 부족함에도 불구하고 뛰어난 피로성능을 보인 I-170SC모델의 반원형 Punch hole형상과 비교 대상인 I-170ST의 삼각형 Punch hole형상에 관하여 피로 성능을 규명하였다. 해석 모델에 대하여 모의 시험하중을 입력하였을 때 동일한 재료 및 시험 조건에서 Punch hole 우각부에서 발생하는 최대 응력 f_{max} 와 Punch hole 둘레의 절점에서 발생하는 응력들의 평균으로 f_{nom} 을 구하여, Punch hole 형상에 따르는 응력 집중계수 K를 구하였는데, 이는 평균 응력과 최대 응력 간의 비율로써 K 값이 작다는 것은 응력 집중의 효과가 크지 않다는 것을 의미한다.

$$K = \frac{f_{max}}{f_{nom}} \quad (1)$$

여기서, K는 응력 집중계수, f_{max} 는 최대 응력 그리고 f_{nom} 은 평균응력이다.

따라서, 해석모델에 대하여 유한요소 해석을 수행한 후, Web Hole 형상에 따른 Hole 주위의 응력 분포와 응력 집중계수를 알아보기 위하여 표 4와 그림 7과 같이 구하였다.

그 결과 주어진 하중조건 하에서 단면 형상에 따라 발생할 수 있는 응력 집중은 반원형의 경우 삼각형 단면에 비해 고른 응력을 나타내어, 삼각형 단면보다 우각부에 전달되는 응력을 효과적으로 분산시킨 것으로 판단되어 진다. 삼각형 단면보다 반원형 단면이 반복하중에 대하여 응력 분산의 효과가 우수하여, 피로성능이 탁월함을 확인하였다.

표 4 Punch Hole 형상에 따른 응력 집중 계수

| | I-170SC (반원형) | I-170ST (삼각형) |
|--------------------------|------------------|------------------|
| f_{max} (kgf/cm^2) | 293 | 253 |
| f_{nom} (kgf/cm^2) | 37.5 | 32.0 |
| 응력집중계수 (K) | 7.81 | 7.91 |

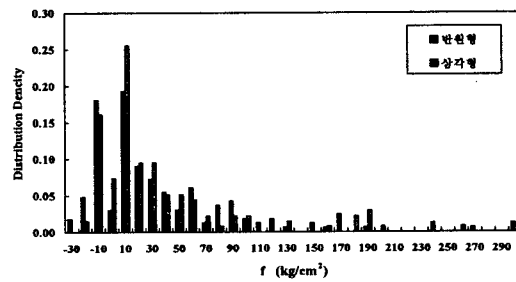


그림 7 Hole 형상에 따른 응력 분포 밀도

5. 개량형 I형강에 대한 수치해석

5.1 해석 모델링

상판은 하중을 직접 지지하는 부재이기 때문에 피로재구성 확보가 매우 중요하다. 따라서 I형강 슬래브의 주부재 I형강은 무엇보다도 피로성능이 우수하여야 하기에, 본 개량형 모델은 정적강도는 다소 떨어지나 피로성능이 우수한 I-170SC 모델을 기본으로 하였다. 그리고 Web의 Hole은 콘크리트 원활한 유동성 확보와 주부재와 콘크리트의 일체화가 가능하도록 가능한 크기가 커야한다. 그러나 Hole로 인하여 단면 Loss가 크면 정적 강도에 큰 영향을 주는 단점이 있다. 따라서 우각부 하부의 응력이 크게 나타난 I-170SC의 단점을 개선하여 단면 Loss가 크면서도 Hole 주변으로 응력을 고루 분산시켜 삼각형 형상인 I-170ST와 유사한 정적 강도를 가지면서, 또한 피로성능에서도 I-170SC보다 우수한 Hole 형상을 개발하는 것을 목표로 선정하였다.

해석은 경계조건 및 하중 모두 상기 방법과 동일한 조건으로 하여 해석하였다.

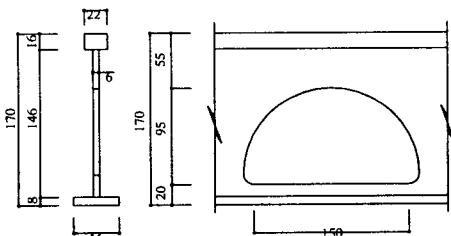


그림 8 개량형 시험체

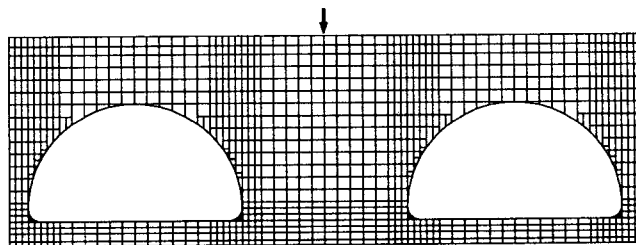


그림 9 개량형 해석모델

5.2 해석 결과

해석결과 미소한 양이지만 단면 Loss가 I-170보다 많은 개량형의 최대응력이 다음 표 5와 그림 10에 나타나듯 I-170ST와 유사하게 상당히 작은 값을 나타내면서, 피로성능에 중요한 응력집중계수 또한 매우 작게 나타났다. 즉 개량형이 I-170SC보다 f_{max} 는 작으면서 f_{nom} 은 크다는 것은 그만큼 하중을 부재 전체적으로 고루 분산시켜 그 성능이 우수함을 나타내었다.

표 5 Punch Hole 형상에 따른 응력 집중 계수

| | I-170SC | 개량형 |
|--------------------------|---------|------|
| f_{max} (kgf/cm^2) | 293 | 250 |
| f_{nom} (kgf/cm^2) | 37.5 | 39.3 |
| 응력집중계수 (K) | 7.81 | 6.36 |

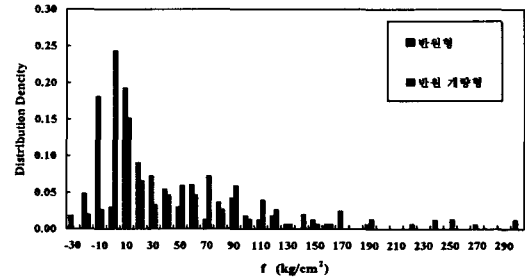


그림 10 Hole 형상에 따른 응력 분포 밀도

6. 결 론

본 실험과 해석결과 정적 성능면에서 Punch hole 형상이 단면 Loss가 적은 삼각형 단면이 반원형보다 우수하였으나, 피로성능은 반원형이 삼각형보다 우수하였음을 확인하였다.

또한 개량형 I형강의 경우 단면 Loss가 큼에도 불구하고 정적 및 피로성능이 탁월하게 우수함을 확인하여, 주부재 I형강 성능에 주요 조건은 Web Hole의 형상임을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 현대건설 기술연구소 (과제명 : 교량구조물 상판 가설공법에 관한 연구, 1999) 지원 및 1998년 중앙대학교 연구기자재 구입지원 프로그램에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 정영수 외, "I 형강 격자 상판에 대한 실험적 연구", 한국 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제12권 1호, 2000.5, pp458~463
2. "도로교 표준시방서", 건설교통부, 1996
3. 松井繁之 외, "I 形鋼格子床版", 鋼橋と基礎 98-7, pp.45~51
4. 大田孝二 외, "鋼少數主桁橋に適用するI形格子床版の設計法に関する考察", 鋼橋と基礎 98-7, pp.45~51
5. "I形鋼格子床版の劣化機構と疲労耐久性に 關す 研究", 構造係大 세미資料, 1996.6.3
6. "I 形鋼格子床版の 少化疲労耐久性に 關す 研究", 構造係大 세미資料, 1996.1.29
7. "I 形鋼格子床版設計資料", 建設消土木研究所資料 第308号, 1967.4.