

ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 정적 강도평가식

Static Strength Evaluation Equations of ㄱ Type Perfobond Rib Shear Connectors

이흥수* 정철현** 손유식***

Lee, Heung-Su · Chung, Chul-Hun · Sohn, You-Shik

ABSTRACT

The ㄱ type perfobond rib shear connector is a ㄱ type flat steel plate with a number of holes punched through. This connector can be effectively used in girder with high shear. The ㄱ type perfobond rib shear connector exhibit very stiff behaviour under service load conditions and also had the characteristic of retaining a significant amount of load after the attainment of ultimate capacity. A regression analysis, which is based on a model that takes into account the contributions of concrete dowels formed by the rib holes, the transverse reinforcement, the strength of concrete in front of the rib, and the ㄱ type plate as well as a nonlinear finite element analysis, is used in the derivation. An empirical equation for the design of ㄱ type perfobond rib shear connector is proposed.

1. 서론

합성구조에서는 강재와 콘크리트를 일체로 거동하게 하는 것이 중요하며, 이것은 주로 기계적 장치인 전단연결재에 의하여 도입된다. 일반적으로 사용되는 전단연결재인 스티드 전단연결재의 여러 문제점을 해결하기 위하여 최근 들어서는 피로특성과 시공성이 우수한 perfobond 리브 연결재가 주목을 받고 있다. ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재는 구조적으로는 소수의 전단연결재로 많은 스티드의 대체가 가능하기 때문에 과형부강판 합성거더와 같이 수평전단응력이 크게 발생하는 거더 형식에 효과적으로 적용이 가능하다. 또한, ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재는 스티드 전단연결재의 시공이 매우 어려운 그림 1과 같은 원형강판 내부에 콘크리트를 충전한 충전강판(CFT) 거더에 적용시 시공성을 향상시키는 것이 가능하다.

정철현 등(2005)은 그림 2에 나타낸 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 형상을 결정하는 주요 변수를 고려하여 제작된 시험체에 대해서 push-out 실험을 수행하여 주요 변수 영향에 따른 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재에 대한 전단내력을 평가하였다.

전단내력을 보면, ㄱ형 perfobond 리브 연결재는 plate 리브 연결재보다 약 42% 전단내력이 증가하고, perfobond 리브 전단연결재에 비해서는 약 22% 전단내력이 증가되어 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재가 상당히 높은 수준의 전단내력을 발휘하는 것으로 확인되었다.

*정회원, 비비엠코리아(주) 기술연구소 실장

**정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수

***정회원, 비비엠코리아(주) 기술연구소 상무

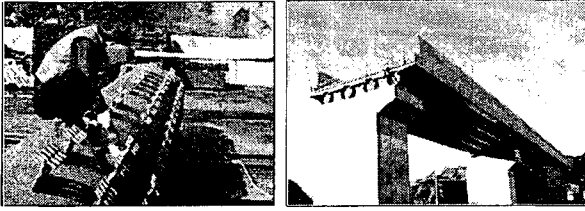


그림 1. 충전강관 거더 합성형교

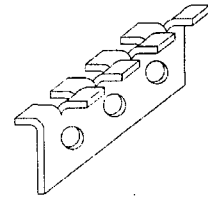


그림 2. 7형 perfo-bond 리브 전단연결재

본 논문에서는 7형 perfo-bond 리브 전단연결재에 대한 push-out 실험결과와 비선형 유한요소해석 결과 등을 바탕으로 하여 7형 perfo-bond 리브 전단연결재에 대한 정적 강도평가식을 제안하였다.

2. 비선형 유한요소해석

유한요소해석은 일반적으로 사용되는 ABAQUS 6.4를 사용하여 수행되었다. 해석 시간을 단축시키기 위하여 그림 3과 같이 1/2만 모델링 하였으며, 콘크리트 슬래브, 7형 perfo-bond 리브 전단연결재와 강관은 8절점 솔리드 요소인 C3D8 요소를 사용하여 모델링하였다. 철근은 2절점 3차원 트러스 요소인 T3D2 형태를 갖는 embedded 요소를 사용하여 모델링하였다.

콘크리트의 재료모델은 수정 Hognestad 응력-변형률 곡선을 이용하여 모델링하였다. 해석시 사용된 콘크리트의 압축강도는 공시체 평균압축강도인 $34.8 MPa$, 프아송 비는 0.18, 탄성계수는 콘크리트 설계기준에 따라 결정하였으며, 콘크리트의 유효응력이 $0.3 f'_c$ 에 도달할 때까지 선형탄성거동을 한다고 가정하였다. 철근과 강재의 탄성계수는 각각 $2.0 \times 10^5 MPa$ 과 $2.1 \times 10^5 MPa$ 이며, 프아송 비는 0.3을 사용하였고 각각의 항복응력이 $350 MPa$, $300 MPa$ 인 탄소성모델을 사용하였다.

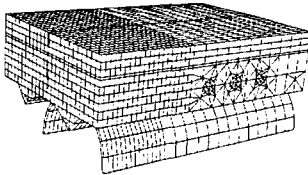


그림 3. Push-out 시험체의 모델링

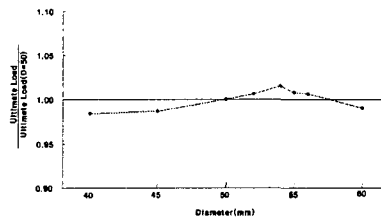


그림 4. 홀 직경 변화에 따른 전단내력

그림 4는 홀 직경 변화에 따른 비선형 유한요소해석의 결과를 직경이 50mm인 경우의 전단내력에 대하여 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 홀의 직경이 54mm인 경우에 최대값을 나타내고, 이후에 전단내력이 감소함을 볼 수 있다. 홀의 중심간 거리/홀 직경의 비가 감소함에 따라 강도가 증가하다가, 비율이 2.22배(홀 중심간 거리 120mm, 홀직경 54mm)보다 작아지면서 전단내력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 값은 Hosain (1994)이 제시한 perfo-bond 리브 전단연결재의 홀 중심간의 간격이 홀 지름의 2.25배를 넘어야 콘크리트의 다웰효과가 제대로 나타난다는 실험결과와도 유사한 결과이다. 따라서, 홀의 중심간 거리/홀 직경의 비율은 최소한 2.22배 이상을 유지하는 상태에서 홀 직경을 크게 하는 것이 좋다고 판단된다.

7형 perfo-bond 리브 전단연결재는 콘크리트에 의한 파괴가 주파괴모드이다. 따라서, 7형 perfo-bond 리브 전단연결재의 거동을 이해하고자 리브 전면 콘크리트의 극한응력상태를 고찰하였다. 그림 5와 같이 모든 방향에서 리브 전면 콘크리트에 압축이 발생하며 리브 바로 밑부분에는 일축압축강도의 대략 6배 정도의 지압응력이 발생하였다. 실험결과와 해석결과에서 보듯이 리브 바로 밑부분 콘크리트에서 지압파괴가 발생하는 것으로 판단된다.

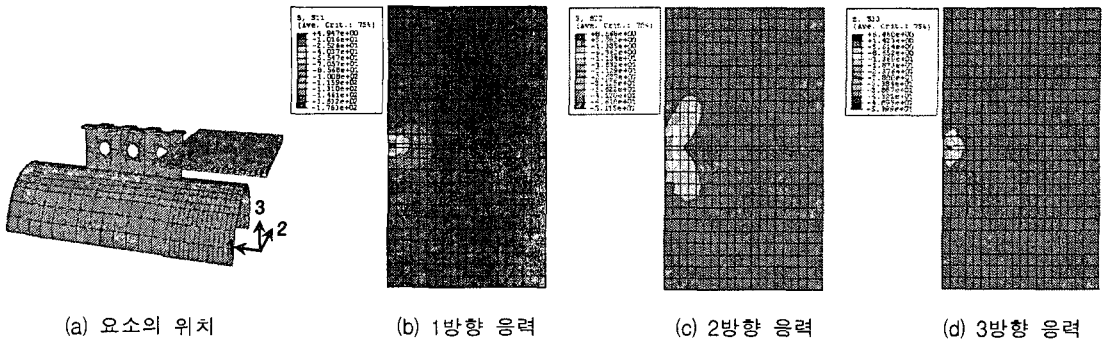


그림 5. 강관과 슬래브 경계면에 있는 단면의 응력 분포

3. 7형 perfobond 리브 전단연결재의 정적 강도평가식

7형 perfobond 리브 전단연결재에 대한 전단실험과 비선형 유한요소해석 결과에 근거하여 전단내력을 예측할 수 있는 정적 강도평가식을 회귀분석을 이용하여 유도하였다. 회귀분석은 리브 전면 콘크리트에 의한 지압저항의 효과, 리브 홀에 의해 형성된 콘크리트의 다웰작용의 효과, 횡방향 철근의 효과, 머리부분의 효과를 고려하여 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$Q(kN) = 4.5 h_r t f_{ck} + 1.1 n d^2 \sqrt{f_{ck}} + 1.1 A_{tr} f_y + 1.6 m t B f_{ck} \quad (1)$$

여기서, $Q(kN)$ 는 7형 perfobond 리브 전단연결재의 개당 정적 극한강도, $h_r(mm)$ 은 리브의 높이, $t(mm)$ 는 리브의 두께, $f_{ck}(MPa)$ 는 콘크리트 압축강도, n 은 홀 개수, $d(mm)$ 는 홀 지름, $A_{tr}(mm^2)$ 은 횡방향 철근 단면적, $f_y(MPa)$ 는 횡방향 철근의 항복응력, m 은 보강된 머리 개수, $B(mm)$ 는 보강된 머리의 내민 길이이다.

정적 강도평가식의 유효성을 평가하기 위하여 실험값과 예측값의 비교를 그림 6에 도시하였다. 그림 6을 보면 예측값의 분포가 실험값에 근접하게 분포함을 볼 수 있다.

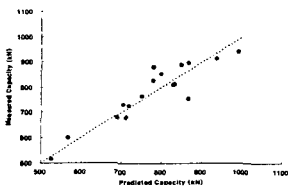


그림 6. 실험값과 예측값의 비교

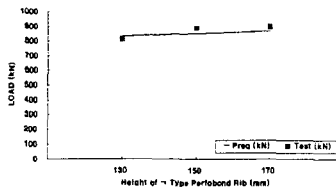


그림 7. 리브 높이에 따른 비교

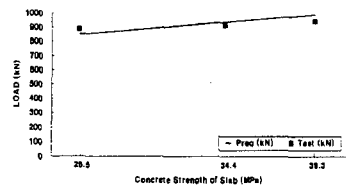


그림 8. 콘크리트 강도에 따른 비교

식 (1)에서 첫 번째 항은 리브 전면 콘크리트의 저항성분으로서 콘크리트의 지압저항능력을 나타낸 것이다. 리브 전면 콘크리트의 기여성분인 첫 번째 항의 비율을 7형 perfobond 리브 전단연결재 실험체에 대해서만 보면 평균적으로 전단내력의 18.5%를 부담하는 것으로 나타났다. 그림 7은 리브 높이에 따른 실험값과 예측값의 비교를 나타낸 것이며, 그림 8은 콘크리트 강도에 따른 실험값과 예측값의 비교를 나타낸 것이다.

두 번째 항은 홀에서 형성되는 콘크리트 다웰효과에 의한 저항능력을 나타낸 것이다. 홀에 의하여 발생하는 저항성분을 7형 perfobond 리브 전단연결재 실험체에 대하여만 보면 평균적으로 전단내력의 5.4%의 전단내력을 부담하고 있다. 그림 9는 홀 개수, 그림 10은 홀 직경에 따른 실험값과 예측값의 비교를 나타낸 것이다. 그림 10의 실험값을 보면 홀 직경이 40mm에서 50mm로 증가하면서 전단내력이 증가하다가 홀 직경이 50mm에서 60mm로 증가하면서 전단내력이 감소하게 되는바, 유한요소해석

에서 살펴본 바와 같이 홀 중심간 거리대 홀 직경의 비율이 2.22배로서 비율이 최소가 되는 홀 직경 54mm를 표시하였다.

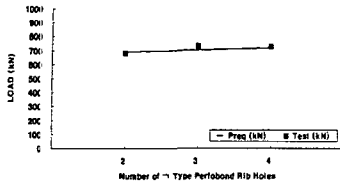


그림 9. 홀 개수에 따른 비교

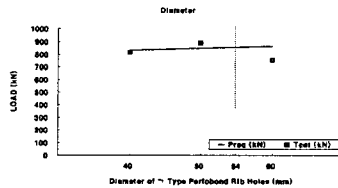


그림 10. 홀 직경에 따른 비교

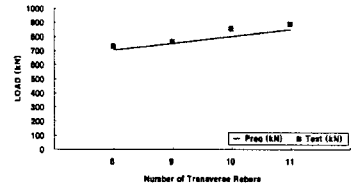


그림 11. 횡방향 철근 개수에 따른 비교

세 번째 항은 슬래브에 배근된 전체 횡방향 철근의 저항능력을 나타낸 것이다. Γ 형 perfobond 리브 전단연결재 실험체에 대해서만 보면 평균적으로 전단내력의 59.6%의 전단하중을 분담한다. Push-out 실험결과는 홀에 삽입된 횡방향 철근의 개수가 증가함에 따라 평균 6.7% 정도의 전단내력의 증가가 나타났으며, 예측된 강도평가식에서는 평균적으로 대략 6.4%의 극한내력의 증가가 나타났다. 그림 11은 홀에 삽입된 횡방향 철근 개수의 증가에 따른 실험값과 예측값의 비교를 나타낸 것이다. 예측된 강도평가식에서 횡방향 철근 개수의 증가에 따른 전단내력의 증가는 실험결과의 증가 경향을 근접하게 예측함을 알 수 있다.

네 번째 항은 머리부분의 저항능력을 나타낸 것이다. 머리부분이 보강됨에 따라 실험값의 전단내력은 22%와 30.4%의 증가를 보이며 예측값의 전단내력은 23.9%와 19.1%의 증가를 보이고 있어, 예측값에 의한 증가분이 실험결과에서의 증가분에 근접한 결과를 보임을 알 수 있다. 따라서, 머리부분의 저항능력 증가에 대한 예측 정도는 적절한 수준이라고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재에 대한 push-out 실험결과와 비선형 유한요소해석에 근거하여 회귀분석을 통하여 정적 강도평가식을 제시하였다.

비선형 유한요소해석에 의해 리브의 전면에는 콘크리트가 리브 바로 전면에는 삼축압축상태에 있으며, 이후에는 작용전단력의 직각방향으로 인장응력이 발생함을 확인하였다. 이와 같은 응력의 발생 형태는 실험 후에 확인한 슬래브와 강관 경계면의 슬래브 콘크리트의 파괴 상황과 유사한 결과이다. 또한, 홀 직경이 증가함에 따라 전단내력이 증가하다가 감소하게 되는데, 해석을 통하여 홀 중심간 거리대 홀 직경의 비가 2.22가 되는 홀 직경이 54mm인 경우가 전단내력 증가의 한계치인 것을 확인하였다. 따라서, Γ 형 perfobond 리브 전단연결재에 설치되는 홀은 홀 중심간 거리대 홀 직경의 비를 2.22배 이상으로 설계하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

정적 강도평가식은 리브 전면 콘크리트에 의한 지압저항의 효과, 리브 홀에 의해 형성된 콘크리트의 다웰작용의 효과, 횡방향 철근의 효과, 머리부분의 효과를 고려하여 4개의 항으로 구성하였다. 예측된 정적 강도평가식을 push-out 실험결과와 비교하여 보면, 예측된 정적 강도평가식은 실험결과를 적절히 예측함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 정철현, 이홍수, 유성근, 최의호(2005) 원형강관 거더와 콘크리트 바닥판 사이 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재의 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 제25권 제1A호, pp.201~212.
- E.C. Oguejiofor and M.U. Hosain, (1994) A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors, *Can. J. Civ. Eng.* 21, pp.614-625