

Perfobond Rib 전단연결재를 사용한 실험체의 전단강도 분석

Analysis on Shear Force of Specimens Using Perfobond Rib Shear Connector

최진웅^{1)*} 박병건¹⁾ 김형준¹⁾ 정호성¹⁾ 박선규²⁾
Choi, Jin Woong Park, Byung Gun Kim, Hyeong Jun Jeong, Ho Seong Park, Sun Kyu

Abstract

The objective of this study which it sees direct shear stress and comparative analysis of flexural shear stress leads and it is a shear stress analysis which it follows in load direction of the structure which uses Perfobond Rib shear connectors. To analyze direct shear stress, five Perfobond Rib shear connect experiments were fabricated with five variables and conducted Push-out Tests. After experiments, mechanism of Perfobond Rib shear connector was examined and direct shear formula was proposed based on primary factors which influence direct shear stress. Also, for the analysis of flexural shear steel-concrete composite slab specimens were fabricated and static flexural test. Based on the static flexural test it analyzed the flexural behavior and the flexural shear stress it calculated. Direct shear stress and EN 1994-1-1 to lead and be calculated, it compared the flexural shear stress and it analyzed in about the shear resistance stress which it follows in load direction.

Keywords : Perfobond rib, Head stud, Flexure shear stress, Direct shear stress.

1. 서론

합성구조로 설계 및 시공 할 때, 가장 중요한 고려 대상은 강재와 콘크리트의 일체 거동이다. 강재와 콘크리트는 각각이 가지고 있는 재료의 변형특성이 서로 다르기 때문에 외력 및 환경의 변화에 따라 두 재료사이에 전단력이 발생하게 된다. 이러한 전단력에 의해서 두 재료 사이에는 상대변위가 발생되며, 발생된 상대 변위에 때문에 구조물에는 강성 및 강도의 저하가 발생한다. 상대변위의 제어 및 강재와 콘크리트의 경계면에서 발생하는 전단력에 저항하기 위해 합성구조에는 필수적으로 전단연결재가 사용된다.

현재 국내에서는 쉬운 시공성과 오랜 경험의 축적에서 오는 신뢰성 때문에 Head Stud형 전단연결재를 많이 사용하고 있다. 하지만 근래에 들어서 Head Stud 전단연결재의 공용중 피로에 대한 문제가 제기되고, 설치한 공간이 협소한 경우 소요 전단저항성능 발휘의 어려움 등 단점이 나타나고 있어 그에 따른 새로운 전단연결재의 개발

및 연구가 필요한 실정이다(이흥수 : 2005).

이러한 Head Stud형 전단연결재의 단점을 보완하기 위해 다양한 전단연결재가 개발 중에 있으며, 그 중 Perfobond Rib형 전단연결재에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. Perfobond Rib형 전단연결재는 전단저항 능력이 좋고, 높은 강성으로 인해 항복전까지 강재와 콘크리트 사이의 상대변위가 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.

이러한 Perfobond Rib형 전단연결재를 안전하고 효율적으로 사용하기 위해서는 역학적 거동 규명 및 전단저항 성능평가에 대한 연구가 필수적이다. 기존의 연구들은 각 실험변수들을 통하여 다양한 실험체를 제작하고 Push-out Test를 통해 Perfobond Rib형 전단연결재의 거동 특성 및 전단저항성능 등에 대한 연구를 진행했다(Oguejiofor : 1994, Medberry : 2002). 하지만 Perfobond Rib형 전단연결재가 교량 등의 구조물에 휨 부재로서 사용될 때에는 외력에 의해 직접전단 거동이 아닌 휨 전단 거동을 하게 된다. Perfobond Rib형 전단연결재가 휨 전

1) 정회원, 성균관대학교 대학원 건설환경시스템 공학과 석사과정

2) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템 공학과 교수

* Corresponding author : cjw85@skku.edu 031-290-7530

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

단거동을 하는 경우 파괴까지의 거동이 직접전단거동은 큰 차이를 나타내기 때문에 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용한 구조물의 직접전단거동과 휨 전단거동의 보다 명확한 전단거동 분석을 위해 직접전단실험과 휨 전단실험을 실시하였다. 먼저 Perfobond Rib형 전단연결재를 이용한 직접전단거동 분석을 위한 실험체를 제작하고, Push-out Test를 실시하여 거동특성을 분석하고 전단저항 평가식을 제안하였다. 또한 분석된 실험을 바탕으로 휨 전단거동 분석을 위한 실험체를 제작하고 4점 재하를 통한 구조물 정적 휨 실험을 실시하여, 실험체의 거동을 분석하였다. 위의 직접전단거동 실험과 휨 전단 거동실험을 바탕으로 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용하는 실험체의 직접전단응력과 휨 전단응력의 차이에 대해서 고찰하였다.

2. 기본 이론

2.1 합성구조의 전단결합정도(η)산정방법

합성 구조에서 전단결합의 정도(Degree of Shear Connection, η)는 강-콘크리트 합성 구조물에서 두 재료사이의 합성정도를 나타내는 수치로 산정방법은 다음 식(1)을 따른다.

$$\eta = \frac{P_{shear}}{(P_{shear})_{fsc}} = \frac{P_{shear}}{P_{steel}} = \frac{M_{psc} - M_{steel}}{M_{fsc} - M_{steel}} \quad (1)$$

여기서, P_{shear} 는 전단저항장치의 기계적 저항력(Shear Connector의 수평전단강도), P_{steel} 는 $A_{steel} \times f_y$, M_{fsc} 는 완전접합시 이론모멘트(ASCE의 M_n 과 동일), M_{psc} 는 부분전단접합모멘트, M_{steel} 는 데크플레이트의 휨모멘트이다.

비합성일 때는 Shear Connector가 없을 때를 의미하며 $\eta = 0$ 이고 $P_{shear} = 0$ 이다. 따라서 합성구조의 강도는 Steel부분의 휨강도 M_{steel} 이 된다. 또한 완전합성은 강-콘크리트가 완전한 일체거동일 경우를 의미하고, $\eta > 1$ 이며 $P_{shear} > (P_{shear})_{fsc}$ 이다. 그러나 대부분의 합성구조는 길이방향 전단 전달장치가 합성보에 비하여 취약하게 되므로 $0 < \eta < 1$ 로 나타나게 되며 이로 인한

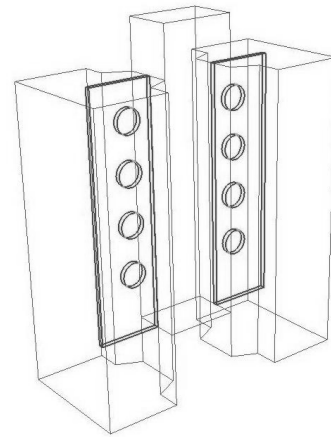


Fig. 1 A solid figure of specimen

합성구조의 휨내력 강도 M_{psc} 는 P_{shear} 의 정도 즉 전단결합의 정도(Degree of Shear Connection, η)에 의해서 표현될 수 있다.

2.2 전단결합정도(η)를 이용한 휨 전단응력 산정

EN 1994-1-1(Eurocode 4, ENV:1994)에서는 전단결합 정도(η)를 이용하여 강-콘크리트 합성 구조의 휨 전단응력을 다음 식(2)와 같이 제시하고 있다.

$$\tau_u = \frac{\eta N_{cf}}{b(L_s + L_0)} \quad (2)$$

여기서, τ_u 는 하중 직각방향에 작용하는 수평전단응력, η 는 전단결합정도, N_{cf} 는 완전합성일 경우 압축쪽 콘크리트의 힘, b 는 단면 길이, $L_s + L_0$ 는 하중재하점부터 실험체 끝단까지 거리이다.

3. 직접전단거동 실험

Perfobond Rib형 전단연결재의 직접전단강도 산정을 위해 3.1절과 같이 4개의 변수로 실험체를 제작하였으며, EN 1994-1-1에서 제안하고 있는 Push-out Test를 통해서 하중변화에 따른 상대슬립량을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 변수에 따른 Perfobond Rib형 전단연결재의 거동특성을 분석하였다. 다음 Fig. 1은 Perfobond Rib 전단연결재를 사용한 실험체의 입체도를 나타낸다.



Photo 1 Test figure of compressive strength specimen

Table 1 Names of specimens and Parameter

Name of Specimen	Parameter		
	Number of Holes(EA)	Distance of Hole (mm)	Number of Reinforcing bars
PR-1	None	-	-
PR-2	4	100(2.0D)	-
PR-3	5	75(1.5D)	-
PR-4	3	150(3.0D)	-
PR-5	4	100(2.0D)	2EA

3.1 직접전단거동 실험체 제작 및 구성

Perfobond Rib형 전단연결재를 사용한 실험체의 직접 전단강도 실험을 위해서 4가지의 실험변수를 통해 5개의 실험체를 제작하였다. 실험변수로는 Perfobond Rib 전단연결재 내부 홀의 유무, 전단연결재 내부 홀의 개수, 내부 홀의 철근 삽입유무, 내부 홀과 홀 사이의 수평간격이다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 30 MPa, 굵은 골재 최대 치수 25mm, 슬럼프 12cm이고, 절고강판 및 전단연결재는 두께 6mm, 항복강도 245 MPa, 강종 SS400을 사용하였으며, 횡방향 철근은 항복강도 400MPa의 H16철근을 사용하였다. 콘크리트 공시체 강도는 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 방법으로 총 3개의 공시체로 압축강도 실험을 실시하였다. 강도는 32.95MPa, 26.34MPa, 33.73MPa이고 그 평균강도는 31.01MPa로 측정되었다. Photo 1은 공시체 압축강도 실험사진이다. 다음 Table 1은 위의 제원 및 실험 변수를 바탕으로 제작된 실험체들의 구성이며 홀과 홀 사이의 수평간격에 대하여 홀의 직경에 대한 비율로 함께 표시하였다. 다음 Fig. 2는 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용한 직접전단강도 실험체의 정면도이고, Fig. 3은 Fig. 2의 A-A부분에서 실험체 단면도이다.

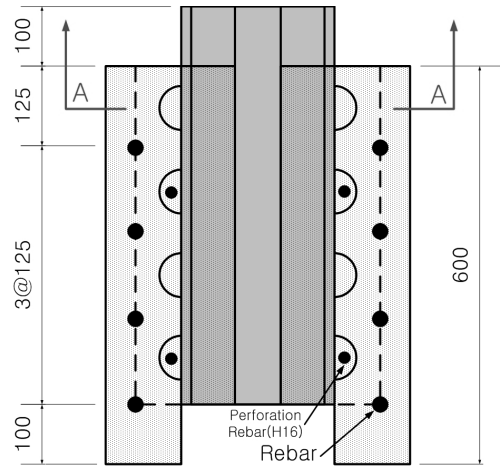


Fig. 2 The front floor plan of specimens

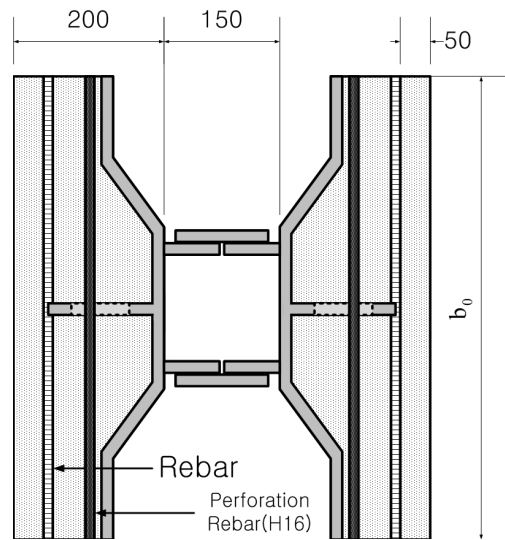


Fig. 3 The cross section of A-A on Fig. 2

3.2 직접전단거동 실험장치의 구성 및 방법

전단연결재의 형상 및 실험변수에 따른 성능의 차이를 파악하기 위해 모든 전단연결재 실험체를 EN 1994-1-1에서 제안하고 있는 직접전단시험(Push-out Test)에 따라 실험하였다. 하중증가에 따른 콘크리트와 강재의 수직방향 상대변위를 파악하기 위하여 LVDT를 설치하고 측정을 실시하였다. 또한 실험체 하단에 두께 20mm의 Neoprene패드를 설치하여 양쪽 콘크리트에서 발생하는 부등응력에 의한 콘크리트의 파괴를 최소화 하였으며, 콘크리트와 강재의 마찰에 의한 저항을 최소화하기 위하여 콘크리트와 강재 사이에 기름을 도포하였다. 하중은 정적하중을 수직방향으로 재하하였다.



Photo 2 Breaking figure of Push-Out Test

3.3 직접전단거동 실험결과 및 분석

앞 절의 변수를 토대로 Perfobond Rib형 전단실험체를 직접 전단 실험하였다. Photo 2는 직접전단실험체 파괴 모습이며, 실험결과를 다음 Table 2와 같이 정리하였다.

실험결과를 분석해보면, 홀이 없는 Perfobond Rib형 전단연결재를 적용한 PR-1 실험체를 제외하고는 대체로 비슷한 실험결과를 나타냈다. PR-1 실험체를 제외한 나머지 실험체들은 320~370kN 정도에서 초기균열이 발생하였으며, 초기균열은 콘크리트 양쪽 측면에서 발생하였다. 또한 최대하중 이후에 상대슬립량이 증가하면서 콘크리트 하부 내측에 수직균열이 발생하여 파괴하였다. 또한 최대하중 이후에는 전단연결재의 능력이 사실상 상실하면서 상대슬립량이 크게 증가하고 콘크리트와 강판이 분리되어 급격히 파괴 되었다. 하지만 횡방향 철근을 삽입한 PR-5 실험체의 경우에는 다른 실험체들에 비해 약 5~19% 높은 하중저항 성능을 나타내었으며 다른 실험체들과 비교해 상대슬립량이 29.4~99.8% 높게 나타났다. 다음 그림 Fig. 4와 Fig. 5는 Perfobond Rib 전단연결재를 사용한 전단실험체의 하중-상대슬립 관계를 나타낸 그래프이다.

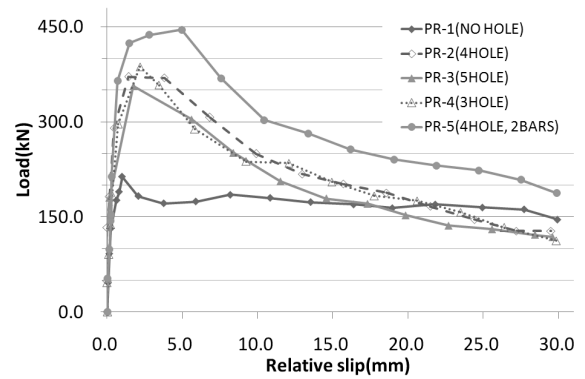


Fig. 4 Load vs. slip between concrete and steel of All Specimens

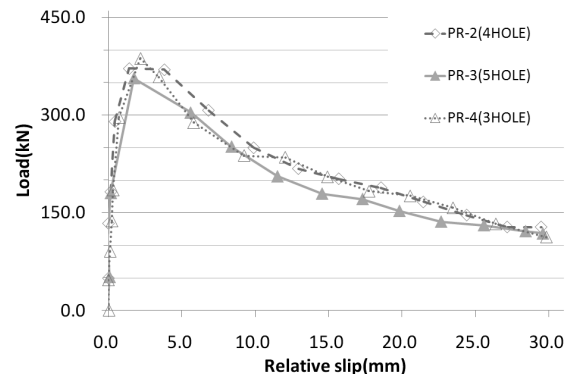


Fig. 5 Load vs. slip between concrete and steel of PR-2, PR-3, PR-4

3.4 직접전단거동 실험결과에 따른 주요인자 분석

본 연구에 사용된 실험변수는 홀의 거리, 홀의 개수, 홀의 유무, 횡방향 철근의 삽입 유무이다. Perfobond Rib형 전단연결재에 주요 영향인자인 위의 변수들을 분석함으로써 Perfobond Rib형 전단연결재의 구조 메커니즘을 분석하고 더 나아가 본 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용하는 실험체의 직접전단강도 평가식을 제안 하도록 하였다.

먼저 Perfobond Rib형 전단연결재 홀의 수평방향 영향을 알아보기 위해 홀이 없는 경우(PR-1)와 홀이 있는

Table 2 Result of Push-out Test

Name of Specimen	Cracked load (kN)	Comparison (%)	Maximum load (kN)	Comparison (%)	Relative Slip (mm)	Note
PR-1	190	100	213	100	1.22	No Holes, Control
PR-2	345	182	396	186	1.96	4 Holes
PR-3	320	168	396	186	2.68	5 Holes
PR-4	340	179	382	179	2.00	3 Holes
PR-5	355	187	457	215	3.80	4 Holes with 2 Rebars

경우(PR-2, PR-3, PR-4)로 나뉘어 실험을 실시하였다. 홀의 거리에 따라 홀의 개수도 변화 하였으며, 달라진 변수에 따른 콘크리트 Dowel 작용에 대한 영향을 분석하였다. PR-1 실험체의 경우 Perfobond Rib형 전단연결재 안에 홀이 없기 때문에 Rib의 선단지지 효과만으로 전단에 대하여 저항하였으며, 이때의 선단지지력은 PR-1의 최대 저항능력인 213kN정도로 판단된다. Table 2에서 나타낸 바와 같이 Perfobond Rib형 전단연결재의 경우 홀의 유무에 따라 전단저항능력의 차이가 상당히 크게 발생하며, 홀이 있는 경우 없는 경우에 비해서 180%정도 높은 전단저항 성능을 나타내었다. 또한 0~213kN의 하중구간에서는 Fig. 4의 모든 실험체의 하중-상대슬립 관계가 거의 유사한 거동을 나타내며, 상대슬립 또한 거의 없었다.

본 연구에서 변수로 홀의 간격을 1.5D~3.0D까지 변화 시키고, 간격에 따라 홀의 개수를 3~5개까지 변화 시켰다. Fig. 5의 실험체 PR-2, PR-3, PR-4에서 알 수 있듯이 홀의 개수의 증감에 따라 실험체의 전단저항 성능은 크게 변하지 않았지만, 각 실험체의 홀 1개당 저항능력을 살펴보면 66.0kN(홀 3EA), 50.5kN(홀 4EA), 36.8kN(홀 5EA)으로 홀의 개수가 증가함에 따라 1개의 홀이 저항하는 저항능력이 줄어드는 것을 알 수 있다. Oguejiofor와 Hosain(1994)의 연구와 Medberry와 Shahrooz(2002)의 연구를 살펴보면, 콘크리트의 Dowel 효과는 그 응력의 영향이 중첩 되면 효과가 떨어진다고 기술되어 있다. 홀의 개수가 늘어나도 콘크리트의 Dowel 효과가 발휘되는 충분한 거리를 확보하지 못하면, 효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 홀과 홀의 거리를 중점적으로 연구한 이홍수(2005)의 논문을 살펴보면 홀간의 거리는 2.25D일 때 Dowel의 효과가 최대가 되는 것으로 나타나고 있다.

3.5 직접전단강도 평가식 제안

Perfobond Rib형 전단연결재에 대한 실험결과를 바탕으로 직접전단저항에 가장 크게 영향을 미치는 주요인자는 ① 선단지지력, ② 콘크리트의 Dowel 효과, ③ 횡방향 철근의 저항능력으로 나타났다. 따라서 이 3가지 주요 변수를 통해 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용하는 구조물의 전단강도 평가식을 제안하도록 한다. 먼저 Perfobond Rib형 전단연결재의 선단에서 저항하는 선단지지력에 대해서 Oguejiofor와 Hosain(1997)은 Perfobond Rib형 전단연결재의 선단부분 지지능력을 리브의 높이(h)와 두께(t), 콘크리트의 지압강도를 반영하기 위한 콘크리트의 압축강도(f_{ck})의 곱으로 제안하였다. 따라서 선단 부분의 지지능력은 실질적으로 리브 형상 및 치수에 따라 많이 좌우 된다.

Dowel에 의한 수평저항 성능은 이중전단을 받는 볼트의 원리와 유사한 형태를 취한다. 볼트의 전단강도는 공칭전단강도와 단면적의 곱으로써 이는 콘크리트의 Dowel 효과로 인한 내력을 평가하는데 적용이 가능하다(Oguejiofor and Hosain(1997)). 따라서 콘크리트 Dowel에 의해 발생하는 전단내력은 평균전단응력, 홀의 단면적, 홀의 수 등의 곱으로 나타내었다. 하지만 콘크리트 Dowel의 영향은 홀의 개수가 증가하여도 홀간의 거리가 줄어들면 영향 중첩에 의해 그 전단저항성능이 줄어드는 것을 앞의 실험결과로부터 알 수 있었다. 이를 정량적으로 평가하기 위해서는 다양한 폭넓은 범위에서의 검증이 필요하나 본 연구에서는 불가능하기 때문에 실험 결과를 바탕으로 홀의 개수 및 거리에 대한 관계를 수치적으로 분석해 회기 분석하여 실용화하는데 목적을 두었다.

마지막으로 Perfobond Rib형 전단연결재의 홀에 관통하는 전단철근의 관한 영향은 전단마찰이론에 의해 횡방향 철근의 단면적 A_s 와 철근의 개수 n, 그리고 철근의 항

Table 3 Comparison Between Equation (4) and Equation (5)

Name of Specimen	Maximum Load (kN)	Equation (4)					Equation (5)					Note
		Resistance of Parameter				Rate of error	Resistance of Parameter				Rate of error	
		(a)	(b)	(c)	Total		(a)	(b)	(c)	Total		
PR-1	213	212.8	0	0	212.7	0.1	112.7	0	0	112.7	47.1	No Holes, Control
PR-2	396	212.8	162.8	0	375.5	5.2	112.7	196.1	0	308.8	22.0	4 Holes
PR-3	396	212.8	166.7	0	379.3	4.2	112.7	245.1	0	357.8	9.6	5 Holes
PR-4	382	212.8	155.5	0	368.3	3.6	112.7	147.1	0	259.8	32.0	3 Holes
PR-5	457	212.8	162.8	60.4	435.9	4.6	112.7	196.1	144.6	453.4	0.8	4 Holes, 2 Rebars

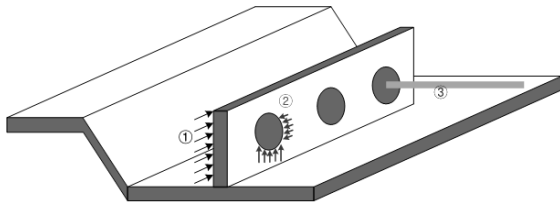


Fig. 6 Parameter of Direct Shear Stress

복강도 f_y 의 곱으로 나타낼 수 있다. 다음의 Fig. 6은 Perfobond Rib형 전단연결재의 직접전단저항강도에 영향을 미치는 인자를 나타낸 것이다.

위의 전단저항의 주요인자 분석을 통해 다음 식 (3)과 같이 Perfobond Rib 전단연결재를 사용하는 구조물의 전단정항성능에 관한 영향인자를 구성하였다.

$$V(kN) = \beta_1 h t f_{ck} + \beta_2 n_1 d^2 \sqrt{f_{ck}} + \beta_3 n_2 A_s f_y \quad (3)$$

여기서, V 는 Perfobond Rib형 전단연결재의 전단저항 성능(kN), $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 는 회귀분석 변수, h 는 리브의 높이(mm), t 는 리브의 두께(mm), f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도(MPa), n_1 는 Perfobond Rib형 전단연결재 안의 홀 개수, d 는 Perfobond Rib형 전단연결재안 홀의 지름(mm), n_2 는 횡방향 철근의 개수, A_s 는 횡방향철근의 단면적(mm^2). f_y 는 횡방향 철근의 항복강도(MPa)이다.

위의 식(3)를 바탕으로 변수분석 및 회귀분석을 실시하여 Perfobond Rib형 전단연결재의 직접전단강도를 예측할 수 있는 강도평가 제안식은 식 (4)과 같다.

$$V(kN) = 8.49 h t f_{ck} + \alpha n_1 d^2 \sqrt{f_{ck}} + 0.38 n_2 A_s f_y \quad (4)$$

(단, α 값은 β ($\beta =$ 각 Dowel홀 거리/홀의 직경)에 따라 변화하며, $\beta \leq 1.5$ 경우 $\alpha = 2.25$, $1.5 \leq \beta \leq 3.0$ 인 경우 $\alpha = 0.7732\beta + 1.2009$, $\beta \geq 3.0$ 이상인 경우 $\alpha = 3.5$ 를 적용한다.)

본 연구에서 제안하고 있는 제안식 기존의 제안식과 다른 점은 홀과 β 값을 변수로 하여 콘크리트 Dowel효과에 대한 보다 정확한 분석을 추구한 점이다. 콘크리트의 Dowel 효과는 기존의 연구에서 알 수 있듯이 홀의 직경 및 홀과 홀의 거리에 따라서 그 영향이 중첩되기 때문에 이에 대한 고려가 필수적이라고 생각되어진다. 이홍수

(2005)의 연구결과에 따르면 콘크리트의 Dowel 효과는 홀과 홀의 간격이 2.25D일 때 최대가 되는 것을 알 수 있다. 또한 2.2D이하인 경우 1개 홀의 효과가 약 12%감소하는 경향을 나타냈으며, 2.5D이상인 경우에는 1개 홀의 효과가 약 6%감소하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서는 기존의 일괄적인 변수분석과는 다르게 콘크리트 Dowel의 수평방향 성분에 대한 영향인자를 고려해 보다 정확한 제안식이 될 수 있도록 하였다.

또한 Oguejiofor와 Hosain(1994)은 횡방향 철근의 수를 변화시켜 Push-out Test를 실시해 횡방향 삽입에 따른 직접전단강도의 영향에 대해서 분석하였으며, 실험결과 횡방향 철근의 수에 비례하여 직접전단강도의 크기가 상승하는 것으로 나타나 이에 대한 연구를 식 (5)에 반영하였다. 서론에서 언급된 것처럼 리브전면의 저항, 횡방향 홀의 유무, 횡방향 홀의 철근 삽입유무가 직접전단강도에 영향을 미치는 중요한 인자임은 확실하나, 그 형상과 치수에 따라 요소별 분담력이 변화하기 때문에 이에 대한 정량적 수치화는 어려운 부분이 있다.

본 논문에서는 식 (4)의 효율성 검증 및 검토를 위해 본 논문과 가장 유사하게 실험된 Oguejiofor와 Hosain(1997)이 제안한 식 (5)와 비교를 실시하였다.

$$Q = 4.50 h t f'_c + 3.31 n d^2 \sqrt{f'_c} + 0.91 A_{tr} f_y \quad (5)$$

여기서, Q 는 Perfobond Rib형 전단연결재의 전단저항 성능(kN), h 는 리브의 높이(mm), t 는 리브의 두께(mm), f'_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), n 은 Perfobond Rib형 전단연결재 안의 홀 개수, d 는 Perfobond Rib형 전단연결재안 홀의 지름(mm), A_{tr} 은 횡방향철근의 총 단면적(mm^2). f_y 는 횡방향 철근의 항복강도(MPa)이다.

다음 Table 3은 식 (4)를 사용했을 경우와 식 (5)를 사용하였을 경우의 비교 분석 표를 나타낸다. 여기서 ①은 리브 전면의 저항능력, ②는 콘크리트 Dowel에 의한 저항능력, ③은 철근 삽입에 따른 저항능력을 나타낸다. Table 3을 분석해보면 식(4)의 경우 오차율 0.1~5.2% 사이 값으로 비교적 잘 맞는 것으로 나타났으며, 주된 오차원인은 콘크리트 Dowel 효과에 의해 나타나는 두 번째 항으로 나타났다. 두 번째 항의 경우 결과에 의한 회귀분석으로 β_2 값을 결정하였으므로, 회귀분석에 의한 오차로 고려되어지며, 선단지지에 의한 영향과 횡방향 철근에 의한 효과는 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다.

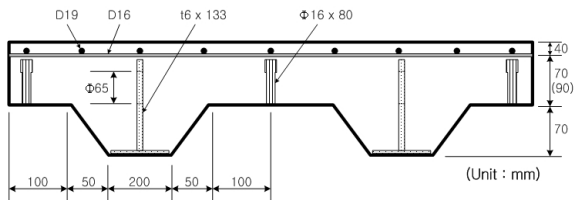


Fig. 7 Cross-section of proposed deck profile HS-PR-Test

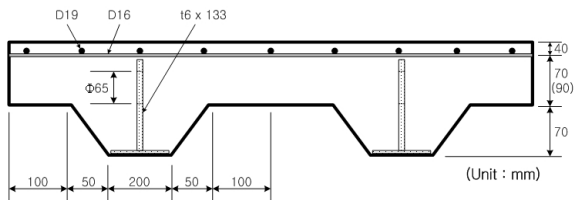


Fig. 8 Cross-section of proposed deck profile PR-Test

식 (5)의 경우에는 식 (4)과 비교해 Perforbond Rib 전면의 저항성분을 약 47%작게 고려하였고, 횡방향 철근에 의한 지지 효과를 2.4배 높게 고려하였으며, 콘크리트 Dowel 효과를 제외한 ㉠성분과 ㉡성분만을 고려한 결과 5.8%의 차이를 나타내었다. 하지만 식 (5)의 경우 콘크리트 Dowel효과에서 9.6~32.0%정도의 오차를 나타내었다. Dowel 효과에 대한 오차의 원인은 Dowel효과에 중요한 영향을 미치는 지름, 홀과 홀의 간격 때문이다. Dowel의 영향은 홀의 간격이 작아지는 경우 중첩되기 때문에(Oguejiofor and Hosain, 1994), 홀과 홀의 간격에 대한 변수를 고려하지 않은 식 (5)는 실험값과의 편차가 높게 나타나는 것으로 보여진다.

4. 휨전단거동 실험

본 연구의 목적은 휨전단응력과 직접전단응력의 관계 분석에 있다. 따라서 앞의 2.2절에서 실험한 Perforbond Rib 전단연결재를 사용하여 휨전단거동을 규명하기 위한 실험체인 강-콘크리트 합성 바닥판을 제작하였다. 제작된 실험체를 4점 하중재하 휨실험을 실시하였고 휨전단 거동을 분석하였다. 또한 Perforbond Rib 전단연결재만을 시공한 실험체와 기존의 도로교 설계기준에서 사용하고 있는 Head Stud형 전단연결재와 Perforbond Rib 전단연결재를 동시에 시공한 실험체를 각각 제작하여 휨전단 거동과 하중저항 능력을 분석하였다.

4.1 휨전단거동 실험체 제작 및 구성

휨전단거동 실험체는 Head Stud 전단연결재의 유무를

Table 4 Names of specimens and Parameter

Name of specimens	specifications (mm)	Parameter (Head Stud)	Note
HS-PR-Test	3,500×1,000×200	○	Head Stud+ Perforbond Rib
PR-Test	3,500×1,000×200	×	Perforbond Rib

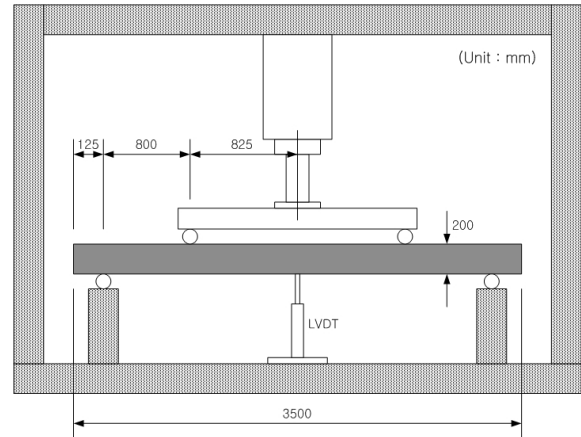


Fig. 9 Set-up for flexural test

변수로 하여 총 2개의 실험체를 제작하였다. 실험체 재료는 강판(SM400, t=6mm), 콘크리트(굵은 골재 25mm, 슬럼프 12, fck(설계기준강도)=30MPa), 이형철근(H19-횡방향 철근), Head Stud($\phi 16 \times 80$ mm)이다. 휨전단 거동 실험체의 제원은 폭(1000mm)×높이(200mm)×길이(3500mm), Perforbond Rib 전단연결재 t6×133mm, Head Stud 전단연결재 $\phi 16 \times 80$ mm, Perforbond Rib 전단연결재 홀 개수 $\phi 65 \times 13$ 개×2층(양쪽 대칭), Head Stud 전단연결재 배치 3개×6열×2층(양쪽 대칭), 횡방향 철근간격 13@125=1625mm이다. 콘크리트 공시체 강도는 콘크리트구조설계기준을 만족시키는 세 개의 공시체 압축실험 평균 강도가 32.63MPa로 측정되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 본 실험에 사용된 휨전단거동 실험체의 단면도이다. Table 4는 아래의 구성을 바탕으로 제작한 실험체의 총괄표이다.

4.2 휨전단거동 실험장치의 구성 및 방법

휨전단거동 실험체의 실험은 Fig. 9에서처럼 4점 재하하였으며, 실험시의 전단 지간비(a/d)는 4.0 이다. 실험체의 거치 시에는 헌지부에서 실험체 끝단까지 거리를 125mm로 하고 처짐 측정을 위해 중앙부에 LVDT를 설치하였다. 또한 강판하부에 철근변형률 게이지를 설치하

Table 5 Results of Flexure Shear Test

Name of Specimens	P_{max} (kN)	P_a (kN)	δ_{max} (mm)	δ_a (mm)	Note
HS-PR-Test	678	626	37.3	27.6	Head Stud + Perfibond Rib
PR-Test	565	37.1	24.2	Perfibond Rib	



Photo 3 Breaking figure of flexural test

여 하중증가에 따른 하부강판의 변형률을 측정하였다.

4.3 휨전단거동 실험결과

휨전단거동 실험체의 실험결과는 Table 5와 같다. 여기서 P_{max} 는 최대하중, δ_{max} 는 최대하중시의 처짐을 나타낸다.

P_a 와 δ_a 는 항복강도와 항복처짐이다. 또한 Photo 3은 대표적인 휨전단실험의 파괴양상을 보여주며 휨전단거동 실험체의 하중-처짐관계는 Fig. 10에 나타내었다.

HS-PR-Test 실험체의 초기 균열은 411kN의 하중에서 실험체 끝단 L/4지점에서 발생하였으며, 하중이 656kN에 도달 하였을 때 콘크리트 압축부에 균열이 발생하였다. 실험 최대하중은 678kN이었으며, 최대 하중 시 처짐은 37.3mm로 측정되었다.

Perfibond Rib 전단연결재만을 시공하여 제작한 PR-Test 실험체는 하중이 245kN에 도달 하였을 때 실험체 단부에서 절곡강판과 콘크리트의 분리가 발생하였으며, 539kN의 하중일 때에 콘크리트와 강판이 크게 분리되며 파괴되었다. 최대하중은 565kN이었으며, 최대 하중 시 처짐은 37.1mm로 측정되었다. Fig. 10에서 나타내듯이 모든 실험체는 약 150kN까지는 거의 유사한 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 Head Stud 전단연결재가 설치되지 않은 PR-Test 실험체의 경우에는 절곡

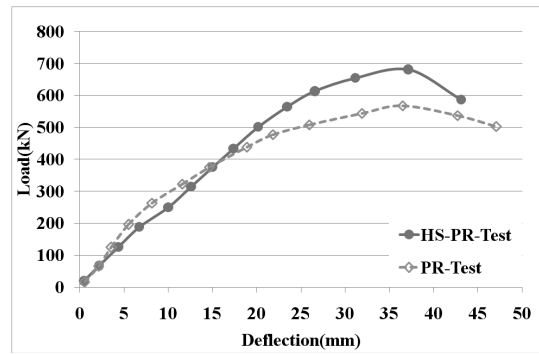


Fig. 10 Load-slip of Flexure Shear specimens

Table 6 Degree of Shear Connection

Name of specimens	P_{max}	η	Parameter (Head Stud)	Comparison of η
HS-PR-Test	678	2.76	○	1
PR-Test	565	2.22	×	0.80

강판과 콘크리트 사이의 부차파괴로 인하여 최대하중이 크게 감소하고 처짐이 증가하는 것을 알 수 있다. 실제 실험과정에서도 Head Stud 전단연결재가 설치되지 않은 실험체는 조기에 강판과 콘크리트의 부착력이 상실되고 강판과 콘크리트의 분리가 급격히 발생하여 실험체가 파괴되는 것을 확인하였으며, 최대 휨 저항성능이 약 10% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

4.4 강-콘크리트 합성 실험체의 전단결합정도

본 연구에서는 휨전단거동 실험결과를 토대로 PR-Test 실험체와 HS-PR-Test 실험체의 전단결합정도를 분석하였다. EN 1994-1-1에서 제시하고 있는 방법에 따라 식 (1)을 이용하여 전단결합정도를 계산하였다. η 값이 클수록 합성능력이 뛰어난 것이며 $\eta \geq 1$ 인 경우에는 모두 완전 합성 상태로 판단한다. 합성슬래브의 내력은 먼저 전단스팬내의 길이방향 전단강도를 구하고 여기서 식 (1)을 사용하여 합성정도 η 를 구한다. 그리고 부분전단 접합모멘트 M_{psc} 을 구하는 것이 순서이다. 그러나 본 실험에서는 강-콘크리트 합성바닥판의 합성정도를 평가하기 위하여 M_{psc} 대신에 실험에 의한 최대 모멘트 M_{max} 을 사용함으로써 간접적으로 टेकप्लेट 변수들에 대하여 강합성정도를 평가하였다.(주기수와 1명(2000년)) 다음 Table 6는 식 (1)을 바탕으로 계산된 각 실험체들의 η 이다.

5. 직접전단응력과 휨전단응력 분석

본 연구는 Perfobond Rib 전단연결재의 직접전단저항 성능에 대해서 분석하고 이러한 요소실험결과를 바탕으로 3.5절을 통해 직접하중에 대한 직접전단력 제안식을 도출하였다. 이렇게 제안된 직접전단응력 제안식과 앞의 2.2절에서 제시한 합성구조의 휨 전단응력제안식(EN 1994-1-1)을 비교하여 궁극적으로 하중방향에 따른 전단응력, 즉 휨전단응력과 직접전단응력의 분석을 실시하였다.

하중 직각방향의 전단력 즉, 휨 전단력을 계산하는 방법은 국내외에서 많이 연구되고 있으며, 휨 전단응력에 대한 연구는 현재 Rui(2008) 등에 의해서 다양하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 EN 1994-1-1에서 제시하는 전단결합 정도(η)를 이용한 식 (2)를 이용하여 휨 전단응력을 산출하고, 산출된 휨전단응력과 식 (4)를 통해 얻어진 직접전단응력을 비교하여 직접전단응력과 휨 전단응력의 관계에 대해서 분석하였다.

HS-PR-Test 실험체 계산결과 휨 전단응력은 $2.9kN/mm^2$, 직접전단응력은 $2.81kN/mm^2$ 로 나타났다. HS-PR-Test 실험체는 Head Stud 전단연결재와 Perfobond Rib 전단연결재를 함께 시공한 실험체이다. Perfobond Rib 전단연결재만 시공한 PR-Test 실험체는 휨 전단응력은 $2.33kN/mm^2$ 을 나타냈고, 직접전단응력은 $2.19kN/mm^2$ 으로 계산 되었다. 기존의 연구결과처럼 휨 전단응력은 수직에서 수평으로 하중단계를 거치며, 응력의 재분배에 의해 직접전단응력 보다 높은 응력이 발생된다. 본 연구에서 제안한 식 (4)가 모든 경우의 Perfobond Rib 전단연결재를 사용한 실험체에서 명확한 결과를 나타내지는 않는다. 하지만 본 연구결과를 통해 일반적인 휨전단응력이 직접전단응력 보다 거의 같거나 비슷한 결과를 나타낸다는 것을 알게 되었다.

최근 신현섭(2005)의 연구를 살펴보면, 표준 Push-out Test에서 얻은 전단연결재의 합성거동과 실제 합성보에서의 전단합성거동에는 분명한 상이성이 존재하며, 특히 합성보가 부분합성 될 경우는 그 차이가 매우 크다는 것이 밝혀지고 있다. 이는, 정모멘트 구간 합성보의 경우 콘크리트 슬래브가 표준 Push-out Test에서 응력 상태에 비해서 높은 압축응력상태에 있다는 사실만으로도 추정될 수 있을 것이다. 설계 계산치와 실제 실험에서 얻은 결과를 비교 했을 때, 경우에 따라서는 부분전단합성으

로 설계된 합성보가 사실상 완전 전단합성거동을 보이고 있다는 실험결과가 이에 대한 예라 할 수 있겠다.

6. 결론

본 연구에서는 Perfobond Rib형 전단연결재를 사용한 직접전단거동 실험체와 휨전단거동 실험체를 제작하여 비교실험을 실시하고 결과를 분석하였다.

- 1) Perfobond Rib형 전단연결재의 직접전단 실험결과 직접전단저항에 영향을 미치는 주요인자는 Rib 전단면 콘크리트 지압저항 효과, 콘크리트 Dowel 효과, 횡방향 철근의 부담력으로 각각 나타났다. 또한 콘크리트의 Dowel 효과는 홀과 홀의 간격에 따라 중첩된다는 사실을 알게 되었다.
- 2) Perfobond Rib형 전단연결재의 실용화를 위해 직접전단강도 실험결과를 바탕으로 회귀 분석을 실시하여 Perfobond Rib 전단연결재의 직접전단강도 평가식을 식(4)와같이 제안하였다. 그 결과 식(4)는 10% 안쪽으로 비교적 잘 맞는 것으로 나타났고, 가장 큰 오차의 원인으로 Dowel 효과와 관련된 두 번째 항으로 나타났다. 이는 회귀분석에 의한 오차로 고려되어지고, 선단지지 및 횡방향 철근에 영향은 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다.
- 3) 휨 전단 실험결과를 토대로 전단결합정도(η)를 산정하고 이를 통해 휨 전단응력을 도출하였다. 도출된 휨 전단응력과 요소 실험을 통해 나타난 직접전단응력을 비교한 결과 휨 전단응력이 약 6%정도 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 강근희, Perfobond 전단연결재의 거동에 관한 실험적 연구, 연세대학교 공학석사학위 논문, 2006.
2. 김태철, 전단지간의 변화에 따른 절곡 강합성바닥판의 수평전단강도, 성균관대학교 공학석사 학위 논문, 2005
3. 대한토목학회 교량 설계 핵심기술 연구단, “도로교 설계기준 해설”, 2008.
4. 신현섭, “합성보와 압발실험체에서의 전단합성거동의 상이성”, 한국강구조학회학술발표회 논문집, 2005. 06.
5. 이흥수, Γ 형 Perfobond 리브 전단연결재의 전단거동, 단국대학교 공학박사학위 논문, 2005.
6. 주기수 외 1명, “데크플레이트 단면형상에 따른 합성슬래브의 합성능력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집”, 제12권 6호, 2000, pp.671-680.

-
7. Eurocode 4. ENV, "Design of Composite Steel and Concrete Structures, Eurocode Committee for Standardisation(CEN)", 1997.
 8. Medberry, S.B. and Shahrooz, B.M., "Perfobond Shear Connector for Composite Construction", Engineering Journal, First Quarter, 2002, pp.2-12.
 9. Oguejiofor. E.C. and Hosain, M.U., "A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors", Canadian Journal of Civil Engineering, 21, 1994, pp.614-625.
 10. Oguejiofor. E.C. and Hosain, M.U., "Numerical Analysis of Push-out Specimens with Perfobond Rib Connectors", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 62, No. 4, 1997, pp.617-624.
 11. Rui Simoes, "Experimental and Analytical Behaviour of Composite Slabs", Steel and Composite structures, Vol. 8, No. 5, 2008, pp.361-388.

(접수일자 : 2010년 2월 25일)
(수정일자 : 2010년 9월 7일)
(심사완료일자 : 2010년 10월 1일)

요 지

본 연구의 목적은 직접전단응력 및 휨 전단응력의 비교분석을 통하여 Perfobond Rib 전단연결재를 사용한 구조물의 하중방향에 따른 전단응력 분석이다. 직접전단응력 분석을 위해서 5개의 변수로 Perfobond Rib 전단연결재 실험체 5개를 제작하고 Push-out Test를 실시하였다. 실험 후 Perfobond Rib 전단연결재의 전단저항 메커니즘을 규명하고, 직접전단응력에 영향을 미치는 주요 인자를 바탕으로 직접전단력을 산출할 수 있는 제안식을 제시하였다. 또한 휨 전단응력의 분석을 위해 강-콘크리트 합성 바닥판 실험체를 제작하고 정적 휨실험을 실시하였다. 정적 휨실험을 바탕으로 휨 거동특성을 분석하고 휨 전단응력을 계산하였다. 직접전단응력과 EN 1994-1-1을 통해 계산된 휨 전단응력을 비교하여 하중방향에 따른 전단저항응력에 대해서 분석을 하였다.

핵심 용어 : Perfobond Rib, Head Stud, 휨 전단응력, 직접전단응력
