

Steel Strap으로 횡구속된 무철근 바닥판의 정적 및 피로거동 특성 연구

A Study on Static and Fatigue Behavior of Restrained Concrete Decks without Rebar by Steel Strap

조 병 완¹⁾ 김 철 환^{2)*}
Jo, Byung Wan Kim, Cheol Hwan

Abstract

In the steel-free bridge concrete deck, steel straps are generally used instead of conventional steel rebar while laterally restrained in the perpendicular direction to the traffic in order for the arching effect of concrete deck. In this paper, the minimum amount of FRP bar is to be suggested based on the structural strength, crack propagation, stress level and others in order to control cracks. As a result of laboratory tests, the structural strength of deck with 0.15 percentage of steel strap showed improved structural strength including ductility. The long-term serviceability of steel strap deck with FRP bar proved to satisfy the requirements and to be structurally stable while showing the amount of crack and residual vertical displacement within the allowable limits after two million cyclic loadings. The structural failure of RC bridge deck is generally caused from the punching shear rather than moment. Therefore, the ultimate load at failure could be estimated using the shear strength formula in the two-way slab based on ACI and AASHTO criteria. However the design criteria tend to underestimate the shear strength since they don't consider the arching effects and nonlinear fracture in bridge deck with lateral confinement. In this paper, an equation to estimate the punching shear strength of steel strap deck is to be developed considering the actual failure geometries and effect of lateral confinement by strap while the results are verified in accordance with laboratory tests.

Keywords : Concrete bridge slab, Steel free, Steel strap, FRP bar, Punching shear

1. 서론

교량바닥판은 차량하중을 직접 받고 동결 및 융해, 습윤 및 건조를 반복하며, 염화칼슘 등 열화 및 부식 촉진 재료와 빈번하게 접촉하므로 교량구조물의 주요 구조 부재중 가장 손상이 많이 발생하는 요소이다. 철근콘크리트 바닥판은 철근의 부식으로 인하여 내하력이 저하되고 바닥판의 공용수명이 단축되기 때문에 이러한 단점을 원천적으로 차단하기 위하여 콘크리트 내부에 철근을 사용하지 않는 FRP bar 보강 바닥판이나 무철근 바닥판 등이 최근에 활발히 연구되고 있다.

무철근 교량바닥판은 Fig. 1과 같이 거더에 Steel strap을 이용하여 횡방향 변위를 구속시키면 바닥판에 면내 압축력이 크게 작용하고 Arching 효과에 의하여 인장철근이 요구되지 않으며 일반적인 철근콘크리트 바닥판과 같

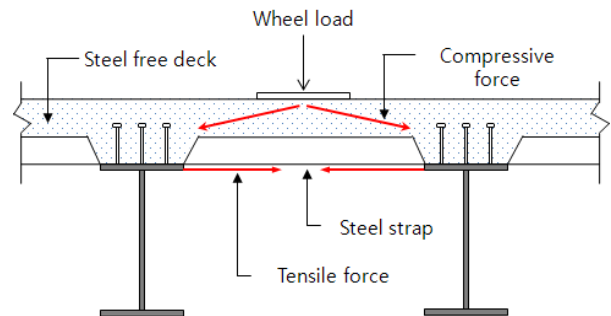


Fig. 1 Concept of restrained concrete deck by steel strap

이 편칭파괴 거동을 유도할 수 있다.

Steel strap 보강 무철근 교량바닥판(이하 ST 바닥판)은 캐나다에서 (Salmon bridge, 1995) 처음으로 시도되었고, CHBDC(1998)에서는 무철근 바닥판에 사용되는 섬유보강 콘크리트의 후균열강도와 Steel strap 단면 설

1) 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

2) 정희원, 포스코건설 Director, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, 교신저자

* Corresponding author : kimchi@poscoenc.com 032-748-2912

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

계식을 규정하고 있다.

Bakht and Mufti(1996)는 2거더교와 3거더교에 대한 축소모형 실험과 실물모형 실험을 하였다. 실험을 통해 Steel strap의 유무에 따라 휨파괴에서 편칭전단 파괴로 파괴모드가 변화하며, 구속 정도가 파괴모드에 많은 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한, Steel strap을 갖는 3거더교에서도 부모멘트에 의한 파괴가 아닌 하중 재하점에서의 편칭전단 파괴가 발생하였다.

Mufti et al.(2004)은 거더 간격이 3.5m 이고 바닥판 두께가 150mm인 아치 형태의 프리캐스트 바닥판을 갖는 실물크기의 2거더 Steel strap 바닥판의 실험을 통해 설계 상세를 제시하였다. Sukrawa(2001)는 거더의 상부 플랜지에 연결한 타이 로드(tie rods)를 갖는 바닥판의 처짐은 약 50% 감소하였으며, 균열하중은 30%, 파괴하중은 13.7% 정도 증가하는 것을 확인하였다.

Salem et al.(2002)은 거더의 단면2차모멘트가 150% 증가한다고 하더라도 파괴하중은 2거더교에서는 11%, 3거더교에서는 15% 정도만 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 거더의 강성은 교량의 내하력 증가에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 무철근 바닥판의 균열제어 및 연성거동을 유도하기 위하여 사용되는 FRP bar의 적절한 배치량을 제안하고, FRP bar 배치량에 따른 거동 특성을 분석하며 200만회 피로실험을 통하여 장기적 내구성 및 사용성을 평가한다. 아울러 ST 바닥판의 Strap에 의한 횡방향 구속도와 바닥판의 파괴형상을 고려한 편칭전단강도 예측식을 제안하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험체 설계 및 제작

실험체는 Table 1에서와 같이 ST 바닥판과 성능 비교를 위한 일반적인 철근콘크리트 바닥판을 같이 제작하였다. 실험체는 크기 효과를 배제하기 위하여 일반적으로 교량에서 사용되는 바닥판의 실물크기로 제작하였으며, 제원은 폭3m, 거더 간격 2.2m, 바닥판 두께 220mm, Steel strap 배치간격은 1m로 하였고 Steel strap 바닥판에는 균열제어용 FRP bar를 배근하였다. Table 1과 이 FRP bar를 전혀 배치하지 않은 실험체와 9mm직경 FRP bar를 125와 250mm간격으로 각각 배치한 3개

Table 1 Experimental specimens of deck slabs

Item	Specimen	Reinforced bar(mm ² /m)		Note
		Main bar	Dist. bar	
Static	ST0	NA	NA	Strap only 38x19
	ST125	Ø9@125 (508mm ² ,0.3%)	Ø9@250 (254mm ²)	FRP bar +Strap
	ST250	Ø9@250 (254mm ² ,0.15%)	Ø9@500 (127mm ²)	FRP bar +Strap
	RC100	H16@100 (1986mm ² ,1.2%)	H13@100 (1267mm ²)	SD400 Rein. bar
	RC200	H16@200 (993mm ² ,0.6%)	H16@200 (993mm ²)	SD400 Rein. bar
Fatigue	STF	Ø9@125	Ø9@250	FRP bar +Strap

의 변수로 실험체를 제작하였다. FRP bar 배근량은 콘크리트구조설계기준의 수축 철근량 최소 0.14% 배근기준과 ACI Report(2004)의 무철근 바닥판 균열제어용 FRP bar 추천 배근량 Ø10, 300mm 간격을 참조하였다.

아치효과를 고려하고 주철근과 배력근을 동일한 간격으로 배근하는 경험적인 설계법인 등방배근 RC 바닥판도 같이 실험을 수행하여 재래적인 RC 바닥판과 ST 바닥판의 정적 거동특성을 비교 분석하였다. RC 바닥판은 전통적인 휨설계 개념을 도입하여 16mm 고강도 철근을 100mm 간격으로 배치한 RC바닥판(RC100)과 배근량을 절반으로 줄여 200mm간격으로 배치한 등방배근 바닥판(RC200)을 제작하였다.

실험의 효율성을 위하여 RC 바닥판과 ST 바닥판의 길이를 각각 3m씩 총 6m 길이의 바닥판 3조를 제작하였다(Fig. 2).

아울러 Steel strap 바닥판의 피로성능 검증을 위하여 200만회 재하시험을 위한 피로 실험체를 제작하였다. 피로실험체의 FRP bar 배치간격은 125mm로 하였고, 피로실험의 목적은 FRP bar의 배치가 균열폭을 제어하는데 얼마나 효과적인지 검증하고, 장기 반복 하중하에서 바닥판의 성능이 제대로 발휘되는지에 대한 검증실험이다.

Steel strap 설계는 CHBDC(1998)의 정모멘트부에서의 무철근 바닥판 설계식을 이용하였으며 공칭 단면적은 다음 식 (1)과 같다.

$$A = \frac{F_s S^2 S_l}{Et} 10^9 (mm^2) \quad (1)$$

여기서 F_s 는 5MPa, S 는 거더 간격(m), S_l 은 Strap

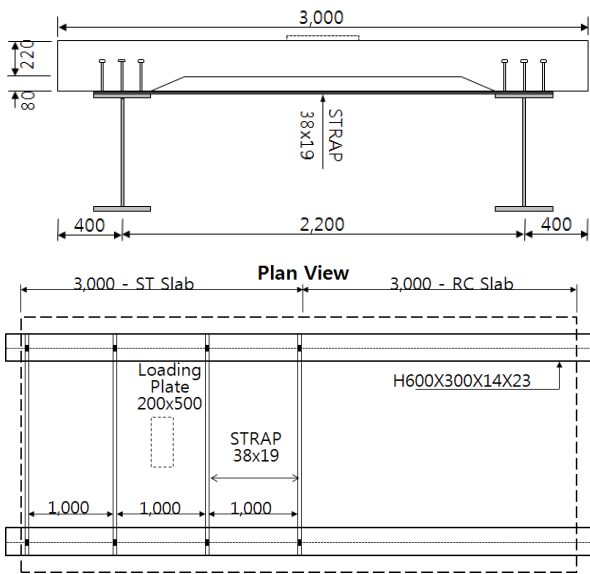


Fig. 2 Sectional and plan view of specimen



Fig. 3 Manufacturing view of test specimen

간격(m), E는 Strap 탄성계수(MPa), t는 바닥판 두께(mm)이다. 식 (1)에 따라 실험체의 Strap 단면적은 폭 38mm, 두께 19mm, 단면적 722mm^2 의 Flat bar를 사용하였다.

실험에 사용된 콘크리트의 재령 28일 설계기준 강도는 40MPa이고, 실측 강도는 50MPa으로 측정되었다. Steel strap은 거더의 횡방향 변위를 구속하기 위하여 거더에 용접하였고 재질은 SM400 ($f_u=400\text{MPa}$, $f_y=240\text{MPa}$)이다. FRP bar 재질은 GFRP($f_u=710\text{MPa}$, $E=42\text{GPa}$)이며, 철근은 SD400($f_y=400\text{MPa}$) 고강도 철근을 사용하였다.



Fig. 4 Installation of gauges and actuator for testing

2.2 실험방법 및 측정내용

하중재하는 DB24 후륜 접지면을 모사하기 위하여 $200 \times 500\text{mm}$ 의 접지판을 사용하였고 Actuator를 사용하여 1점 변위제어로 가력 하였다. 정적 실험은 바닥판 파괴시 까지 순차적으로 가력하였고 지간중앙의 처짐과 바닥판 콘크리트 상연의 압축 변형률, FRP bar 및 Steel strap의 변형률을 측정하였다(Fig. 4).

동적 피로실험은 충격하중이 고려된 후륜 축하중의 2 배에 상응하는 250kN의 하중크기로 200만회 반복실험을 수행하였고 1회, 1만회, 10만회, 30만회, 50만회, 100만회, 200만회 재하 후 각각의 하중단계에서 지간중앙의 처짐과 콘크리트 압축변형률, FRP bar 및 Steel strap의 변형률, 콘크리트 균열폭을 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 정적 재하실험

바닥판 정적 재하실험은 하중이 재하 되었을 때 바닥판의 거동특성을 파악하고, 최초 균열 발생시 하중크기 및 Steel strap의 구속 효과 등을 평가한다.

육안으로 관찰 가능한 바닥판의 최초균열은 150kN 전후에서 발생하였으며 균열폭은 0.05mm 정도의 미세한 균열이었다. Fig. 5는 400kN 재하시까지 균열 발생 양상을 매핑한 것으로 전통적인 RC바닥판(RC100)과 등방배근 바닥판(RC200)은 전반적으로 잔균열이 분산되어 나타났으며, FRP bar를 배치하지 않은 ST 바닥판은 비교적 큰 균열폭이 관측되었으며 최초 균열하중이 120kN으로 20% 정도 균열하중이 감소함을 알 수 있었다. FRP bar를 배치한 ST 바닥판은 RC 바닥판보다 균열이 특정 부위에 집중되는 경향을 보여주었지만 최초균열 하중은 RC바닥판과 유사하였다.

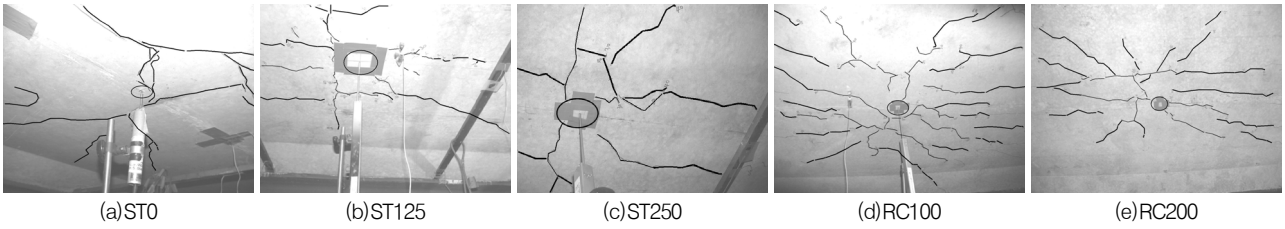


Fig. 5 Crack patterns of deck slabs until 400kN



Fig. 6 Typical failure patterns of deck slabs after a test

Table 2 Measured punching shear strength for static test

Specimen	Max. load (kN)	Displacement (mm)
ST0	981	10.78
ST125	1109	13.24
ST250	997	13.12
RC100	1230	14.60
RC200	1220	18.95

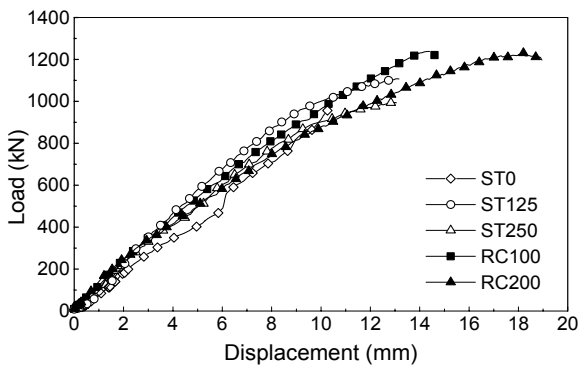


Fig. 7 Load-displacement relation curves

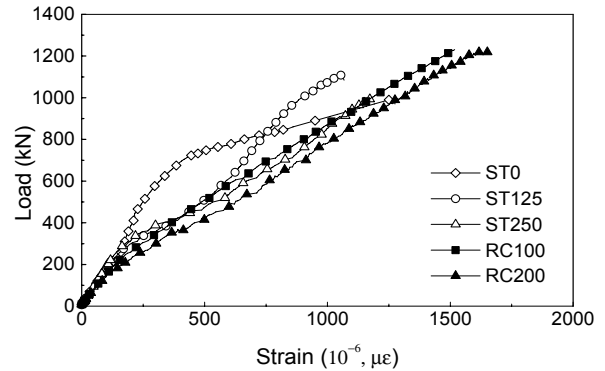


Fig. 8 Compression concrete strain of deck slabs

Fig. 6은 전형적인 교량 바닥판의 파괴 형상을 보여주는데 RC바닥판 및 ST바닥판 모두 휨파괴는 일어나지 않았으며 바닥판 하부는 펀칭전단파괴를 상부 콘크리트는 국부적인 압축파괴를 형태를 보여 주었다.

Fig. 7은 바닥판의 하중-변위 관계 곡선으로 비교적 선형거동을 보여주고 있으나 파괴에 가까워질수록 비선형 거동의 양상을 보여준다.

FRP bar로 보강한 ST 바닥판의 최대 내하력은 1109kN으로 RC 바닥판의 최대 내하력보다 10%정도 작고 연성 또한 다소 작은 값을 보여주었으나 DB24 축하중(130kN) 대비 약 8.5배 안전율을 확보하고 있어 충분히 안전적인 거동을 보여준다. FRP bar를 보강하지 않은 ST 바닥판은 400kN 부근에서 다소 급격한 증가를 보여주고 변위 연성도 FRP bar를 보강한 ST 바닥판 대비 20% 감소하고, 최대 내하력은 981kN으로 13% 정도 감소하나 상시

축하중 대비 7.5배의 안전율을 보여 주었다(Table 2).

바닥판의 균열과 연성거동 즉 사용성을 감안시 ST 바닥판은 최소의 FRP bar 보강이 필요하며 0.15% 정도 배치하면 충분한 사용성과 안전성을 확보할 수 있음을 보여 준다.

Fig. 8, 9, 10은 콘크리트, FRP bar, steel strap의 하중-변형률 곡선으로 탄성범위에서 변형률에 각 재료의 탄성계수를 곱하면 응력값을 얻을 수 있다.

강제, 콘크리트, FRP bar의 탄성계수는 210Gpa, 30Gpa, 40GPa이다.

Fig. 8은 콘크리트 바닥판의 상부 압축 변형률을 보여주며 일반적으로 콘크리트 최대응력시의 변형률이 2000 $\mu\epsilon$ 정도임을 감안할 경우, RC 바닥판의 경우 콘크리트 최대강도에 근접하여 바닥판이 펀칭 파괴할 때 콘크리트 바닥판 상연에서 국부적인 콘크리트의 압축파괴가 동시

Table 3 Measured maximum strain of deck slabs

Specimen	Strain($\mu\epsilon$), s : transversal direction			
	Concrete	FRP_bar	FRP_bar_s	Strap
ST0	-1275	NA	NA	1073
ST125	-1068	4035	3401	1154
ST250	-1183	1669	3121	1201
RC100	-1518	NA	NA	NA
RC200	-1601	NA	NA	NA

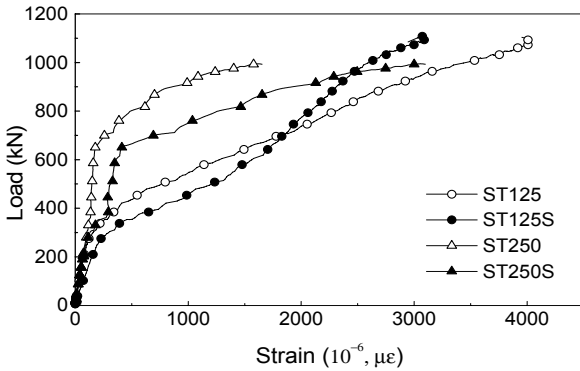


Fig. 9 Strain of FRP bar(S: transverse)

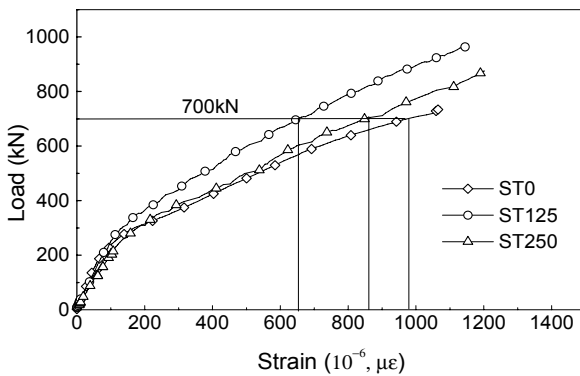


Fig. 10 Strain measurement of steel strap

에 발생함을 추정할 수 있다.(Table 3)

또한 ST 바닥판의 콘크리트 최대변형률이 RC 바닥판의 79% 수준인데 이는 Strap이 하중을 분배시켜 응력을 분산시킨 결과로 판단된다.

Fig. 9는 FRP bar의 변형률 거동특성을 보여주는데 FRP bar의 최대 변형률 4035 $\mu\epsilon$ 은 파단 변형률 17,000 $\mu\epsilon$ 의 24% 수준으로 안정적인 거동을 보여주고 있으며, 400kN 부근에서 다소 급격한 하중 증가 양상을 보여 주었다.

Fig. 10은 Strap의 축방향 변형률을 보여주고 있는데 최대 변형률이 강제 항복시 변형률 1143MPa를 초과하

거나 근접한 값을 보여준다. 이는 바닥판 펀칭 파괴시 Strap도 항복함을 의미하며 이는 ST 무철근 바닥판의 중요한 설계개념으로 바닥판에 철근이 없어도 Strap이 먼저 항복하게 함으로써 어느 정도 파괴 징후를 예측하고 연성파괴를 유도할 수 있는 장치로 볼 수 있다. 또한 FRP bar 배근량이 적을수록 동일 하중크기에서 Strap의 응력이 증가함을 알 수 있다.

정적실험 결과를 종합적으로 판단하면 FRP bar을 배치하지 않은 바닥판도 내하력 측면에서 충분한 안전성을 확보하고 있으나 균열폭이 비교적 크고 발생부위가 특정한 곳에 집중되는 양상을 보여주며 Strap이 항복하기 전에 콘크리트의 펀칭파괴가 선행하여 취성적인 거동 양상을 보여준다. 이러한 이유로 사용성 측면에서 최소한 0.15%의 FRP bar 배치가 필요함을 알 수 있었다.

3.2 피로실험

피로실험은 충격을 고려한 DB24 후륜 축하중의 2배에 상응하는 250kN의 하중을 1점 재하 하였다. 이는 정적 펀칭파괴강도의 23% 수준에 상응하며 200만회 반복실험을 수행하면서 반복횟수 단계별로 처짐, 변형률, 균열폭 등을 측정하였다(Fig. 11).

Fig. 12(a)는 바닥판 중앙에서의 하중횟수 증가에 따른 하중 변위 곡선을 보여주는데, 초기 30만회 재하시까지는 소량의 잔류 처짐이 발생하지만 거의 선형적인 거동을 보여준다. 이러한 양상은 Youn and Chang(1998)의 연구 결과에서도 비슷한 결과를 보여 주었다.

200만회 재하 후는 최대 잔류 처짐량이 2.5mm 정도

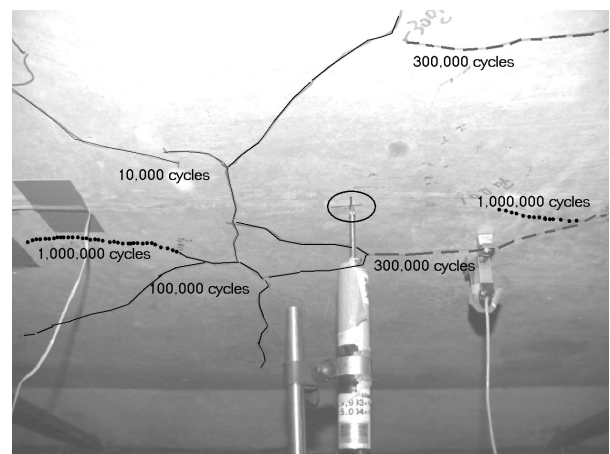


Fig. 11 Crack patterns of deck slabs under cyclic loading

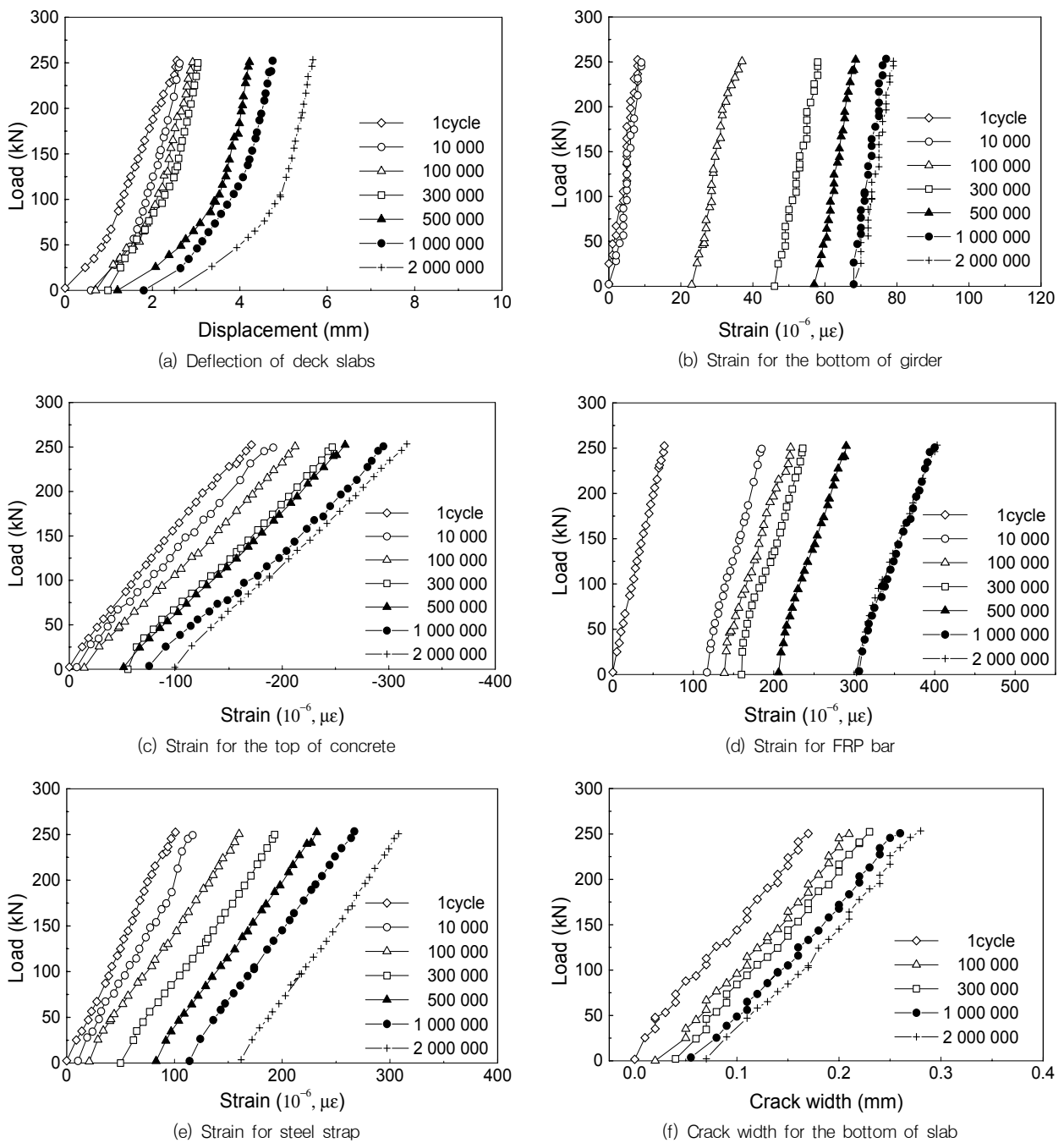


Fig. 12 Deflection and strain measurement under cyclic loading

발생하고 다소 비선형 거동을 보여주었다. Fig. 12(b)는 반복횟수 증가에 따른 강재거더 하부의 인장변형률을 보여주는데 10만회 재하시부터 잔류변형률이 다소 크게 발생하고 200만회 재하시에 $68\mu\epsilon$ 의 잔류변형률이 발생하였다. Fig. 12(c)는 바닥판 콘크리트의 압축 변형률 변화를 보여주고 있으며 200만회 재하후 최대 변형률이 $317\mu\epsilon$ 으로 정적 재하시의 변형률 $170\mu\epsilon$ 대비 86%의 변형률

증가가 발생하였다. Fig. 12(d)는 반복횟수 증가에 따른 FRP bar의 변형률 변화를 보여주며, Fig. 12(e)는 Strap의 변형률 변화를 보여주는데 $157\mu\epsilon$ 의 잔류변형률이 발생하고 최대 변형률이 정적하중 대비 200% 증가하였음을 알 수 있었다.

Fig. 12(f)는 반복횟수에 따른 균열폭의 변화를 보여주는데, 최초 재하시 250kN 하중하에서는 균열개이지 측정

결과 최대 균열폭이 0.17mm 정도 발생하였다. 200만회 재하후는 0.07mm 정도의 잔류균열이 발생하고 균열폭이 정하중 대비 65% 정도 증가하였음을 알 수 있었다. 하지만 상시 공용하중(130kN)하에서 균열폭은 200만회 재하 후에도 0.2mm 이내에서 거동함으로써 우수한 균열제어 능력을 보여 주었다.

4. 편칭전단 강도 평가식

4.1 기존 편칭전단강도 평가식

Khanna et al.(2000)은 다양한 형태로 배근된 실험체에 대해 정적 실험을 수행하고 바닥판에 배근되는 주인장철근이 지배적으로 바닥판의 극한 강도에 기여한다고 보았다. Muttoni(2008)는 바닥판의 편칭강도는 슬래브의 유효높이, 재하면의 크기, 철근비, 철근의 항복강도, 콘크리트 강도, 최대골재크기에 비례하고 ACI318 code는 실험결과보다 평균 37% 과소평가하고 낮은 철근비를 가진 바닥판에 대해서는 안전한 설계를 제공하지 못한다고 밝혔다. 조창빈(2011) 등은 강섬유가 혼입된 압축강도 200MPa급 초고강도 콘크리트 슬래브에 대한 편칭 전단강도를 파괴형상에 근거하여 제시한바 있다. Hassan et al.(2004)에 의하면 철근비 0.5%의 RC 바닥판과 GFRP bar 1.9%의 바닥판의 파괴강도와 연성도는 비슷하며 상부 횡방향 철근량은 편칭전단강도에 거의 영향을 끼치지 않는다는 것을 보여주었다. 국내 도로교설계기준(2010), AASHTO, ACI 평가식은 일반적으로 과소평가되며 이는 바닥판의 철근비, 횡방향 구속효과 등이 고려되지 않았기 때문이다. Graddy et al.(2002)의 연구결과에 의하면 파괴면에 작용하는 힘의 평형을 이용하여 일반화된 편칭전단강도식 (2)를 유도하였다.

$$V_c = 2(b_1 + b_2 + \frac{2d}{\tan\theta}) \frac{d}{\tan\theta} f_t \quad (2)$$

$$f_t = \frac{1}{6} (1 + \frac{2}{\beta_c}) \sqrt{f_c} \geq \frac{1}{3} \sqrt{f_c}$$

여기서 f_t 는 콘크리트 인장강도(MPa), b_1 , b_2 는 재하판의 단면, 장변의 길이(mm), d 는 바닥판 유효깊이(mm), β_c 는 재하판의 변장비, f_c 은 콘크리트 설계기준강도(MPa)이다.

식 (2)의 V_c 를 파괴 위험단면 둘레길이(u_o)에 대하여 일반화하면 $V_c = u_o \frac{d}{\tan\theta} f_t$ 로 나타낼 수 있고, u_o 는 설계코드마다 그 값을 달리하며 그에 따른 설계코드별 편칭전단강도식도 조금씩 차이가 존재한다. ACI318, AASHTO에서는 위험단면은 재하면에서의 0.5d, 편칭 파괴각도를 45°로 가정하였고, Eurocode2(1992)는 위험단면 위치를 1.5d, CEB-FIP(1990)는 2d로, BS8110는 1.5d로 가정하였다. Graddy et al.(2002)에 의하면 일반적인 RC 바닥판의 편칭 파괴 강도는 38°에 가깝고 실험과 이론을 통하여 규명하였다.

바닥판에 대한 편칭파괴 메카니즘은 콘크리트의 재료적 특성과 비선형성으로 인하여 이론적인 접근이 어려워 경험과 실험에 의한 경험식이 많이 제안되었다.

Maeda and Matsui(1984)는 인장축 철근부에서 상부는 순전단파괴영역(파괴각도 45°)으로 하부피복은 철근부에서의 다우웰 효과에 의한 박리파괴영역(파괴각도 30°)으로 구분하여 비교적 정확하게 편칭전단강도식을 예측하였다.

4.2 파괴형상을 고려한 편칭강도

Maeda 평가식에서도 고려된바와 같이 바닥판의 실제 파괴 형상은 직선 형태의 콘 파괴가 아니라 하부쪽으로 갈수록 파괴 각도가 완만해지는 포물선 형태의 콘 파괴에 가깝다. 본 논문에서는 포물선 형태의 콘파괴 형상을 고려한 일반적인 콘크리트 바닥판의 편칭강도 수정식을 제안하고, ST 바닥판과 같이 Strap에 의한 횡구속을 고려한 바닥판의 편칭강도식을 제안하고자 한다.

Fig. 13과 같이 파괴면의 곡선을 2차 포물선으로 가정하고, 편칭파괴시의 콘크리트 파괴 표면적을 구하여 강도식을 다음과 같이 정식화 할 수 있다. 선분 l_s 를 2차 함수로 나타내면 $f(x) = mx^2$ 이고, 함수 $f(x)$ 에 대하여 $f'(x)$ 구간 $x \in [a, b]$ 에서 연속이라고 할 때, $x \in [a, b]$ 에서 함수 $f(x)$ 의 선분의 길이 l_s 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고 식 (3)에 $c = d \cot\theta$, $m = d^{-1} \tan^2\theta$ 를 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$l_s = \frac{c}{2} \sqrt{4m^2c^2 + 1} + \frac{1}{4m} \ln(2mc + \sqrt{4m^2c^2 + 1}) \quad (3)$$

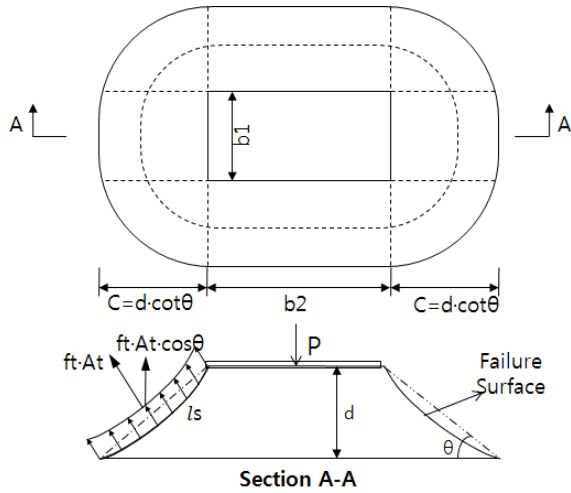


Fig. 13 Punching failure shape of deck slab

$$l_s = \left(\frac{1}{2} \cot \theta \sqrt{4 \tan^2 \theta + 1} + \frac{1}{4} \cot^2 \theta \cdot \ln(2 \tan \theta + \sqrt{4 \tan^2 \theta + 1}) \right) d \quad (4)$$

파괴 형상을 고려하여 펀칭파괴 강도식을 파괴 표면적 A_t 함수로 일반화하면 $V_c = f_t A_t \cos \theta$ 이고 이를 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c = (2b_1 + 2b_2 + \pi d \cot \theta) l_s \cos \theta \cdot f_t \quad (5)$$

4.3 Strap에 의한 횡구속을 고려한 펀칭강도

Strap에 의한 횡방향 구속도 K_s 와 그에 따른 구속력 P_f 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_s = \frac{B_e E A_s}{S_l L}, \quad P_f = \frac{B_e A_s f_y}{S_l} \quad (6)$$

Strap 구속력에 의한 콘크리트 압축응력 f_{comp} 는 Fig. 14와 같이 압축 영역의 기하학으로부터 유도할 수 있다.

$$f_{comp} = \frac{P_f \cot \theta_i}{B_e \cdot b_2} \quad (7)$$

식 (6)의 P_f 와 $\cot \theta_i = L/(2h)$ 를 식 (7)에 대입하여 정리하면 다음 식 (8)과 같다.

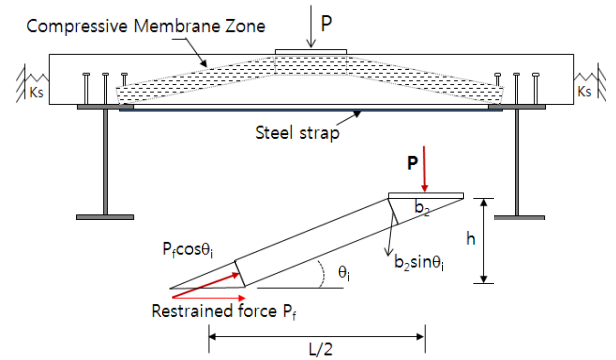


Fig. 14 Compressive force of concrete slab by strap

$$f_{comp} = \frac{A_s f_y L}{2b_2 \cdot h \cdot S_l} \quad (8)$$

여기서, S_l 은 Strap 간격, L 은 거더지간, h 는 바닥판 두께이고, b_2 는 재하판의 장변길이, 바닥판 유효폭(mm) $B_e = 0.25L/(0.12L + 70)$ 는 집중하중이 작용하는 등방성 판이론으로부터 유도할 수 있다. f_y 는 Strap 항복강도로 이는 바닥판의 정적 강도실험 결과(Table 3) 통하여 확인한바 있다.

바닥판의 횡방향 구속도는 RC 바닥판의 경우 이용우, 황훈희(2008)는 주인장철근의 축방향 강성도로 결정되며, Salem et al.(2002)에 의하면 지지 거더의 강성 차이에 의한 영향은 10% 정도로 미미하며, 펀칭전단강도는 파괴면의 경사각도 및 주인장 철근량에 의해 결정된다고 규명하였다(Azad et al., 1994). 따라서 RC 바닥판의 주인장 철근에 상응하는 무철근 바닥판의 Strap의 축강성을 횡방향 구속도의 지배계수로 고려하였다.

Strap에 의한 횡구속효과로 콘크리트에 압축응력이 발생하며, Fig. 15와 같이 Mohr's circle의 기하학으로부터 Arch action을 고려한 펀칭강도식은 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

Fig. 15의 점선은 횡구속에 의한 압축응력을 고려한 것이며, Mohr's circle의 특성으로부터 주축에 대한 파괴각도 θ_c 는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\cos 2\theta_c = \frac{f_{comp}}{2f_t + f_{comp}} \quad (9)$$

$$\theta_c = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{f_{comp}}{2f_t + f_{comp}}$$

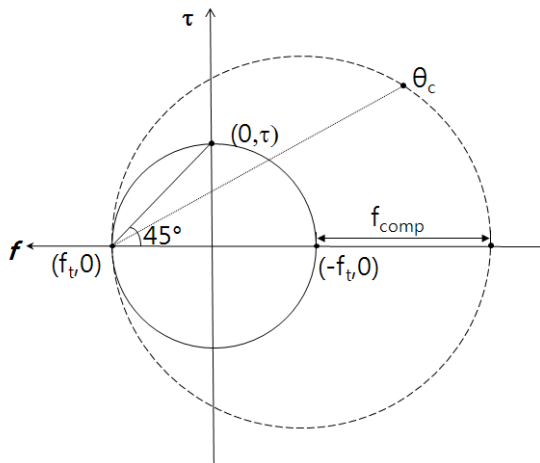


Fig. 15 Geometry of Mohr's Circle

Table 4 Punching shear strength of code and prediction equation

Code & Prediction	Critical section	Characteristics of prediction equations
ACI	0.5d	$V_c = 2(b_1 + b_2 + 2d)d \cdot f_t$
EC2	1.5d	$V_c \propto (1.2 + 40\rho) \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \rho$:rebar ratio
CEB-FIP	2.0d	$V_c \propto \sqrt[3]{100\rho f_{ck}}$
BS8110	1.5d	$V_c \propto \sqrt[3]{100\rho} \cdot \sqrt[3]{f_{ck}/25}$
Graddy	0.5d.cotθ	$V_c = 2(b_1 + b_2 + \frac{2d}{\tan\theta}) \cdot \frac{d}{\tan\theta} \cdot f_t$
Proposed Method	0.5d.cotθ _c	$V_c = (2b_1 + 2b_2 + \pi d \cdot \cot\theta_c) l_s \cos\theta_c \cdot f_t$

파괴시의 형상과 Strap의 횡구속 효과를 고려한 편칭 강도식은 다음 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$V_c = f_t A_t \cos\theta_c$$

$$V_c = (2b_1 + 2b_2 + \pi d \cdot \cot\theta_c) l_s \cos\theta_c \cdot f_t \quad (10)$$

여기서, θ_c 는 횡구속을 고려한 편칭 파괴각도이며, l_s 는 파괴형상을 포물선으로 가정시 위험단면 길이로서 식 (4)에서 유도하였다. 콘크리트 교량 바닥판에 대한 설계 Code식, 기존 연구자들의 제안식, 본 연구 제안식의 편칭 파괴 위험단면과 편칭 강도식의 특징은 Table 4와 같고 이를 실험에 의한 값과 비교 분석하면 Fig. 16과 같다.

Strap의 횡구속을 고려하고 파괴형상을 포물선으로 가정할 경우 ST 바닥판의 편칭전단강도는 1070kN 이다.

Mufti and Newhook(1998) 파괴형상과 힘의 평형방정식을 이상화한 Kinnunen and Nylander(1960)의 식을 근간으로 Strap의 횡구속도를 고려한 ST바닥판의 편

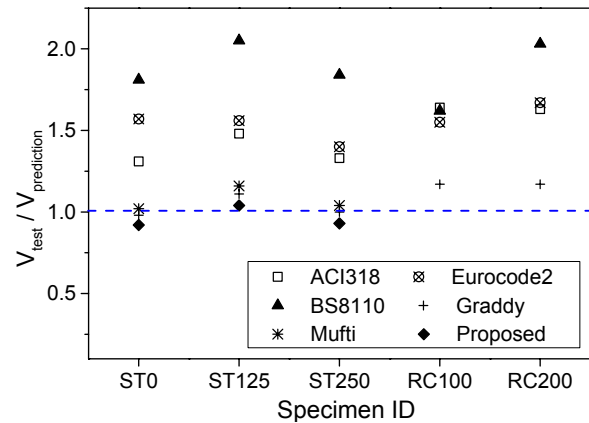


Fig. 16 Comparison of the shear strength proposed equations with test results.

칭강도식을 제안한바 있으며 Mufti 제안식을 적용한 ST 바닥판의 편칭강도는 959kN이다.

Fig. 16은 본 연구의 실험체 바닥판에 대하여 편칭강도 실험값과 예측값을 비교한 것으로 ACI와 Graddy 예측식은 철근비를 고려하지 못하기 실험체 바닥판의 편칭강도는 모두 동일하다. BS8110에 대한 예측값은 실험값과 가장 큰 편차를 보여주었으며, RC바닥판의 경우 Graddy 제안식이 실험결과와 가장 근접하는 결과를 보여준다. ST 바닥판에 대한 Mufti의 제안식은 실험값 보다 7% 과소평가하였고, 본 연구의 편칭강도 제안식은 실험값 대비 평균 4%의 오차율로 비교적 정확하게 실험 강도를 예측하였다.

5. 결론

Steel strap 보강 무철근 교량바닥판은 Strap의 횡구속에 의한 아칭효과로 RC 바닥판에 근접하는 파괴강도를 보여주었다. 철근의 배제로 인한 균열폭 증대 및 취성적인 거동을 보완하기 위하여 바닥 판 내부에 FRP bar를 0%, 0.15%, 0.3% 배치하여 정적 내하력 시험을 수행하였고 아울러 200만회 피로실험을 통하여 장기 사용성을 검증하였다. 아울러 Strap의 횡구속 효과를 고려한 무철근 바닥판의 편칭전단강도식을 제안하여 기존의 예측식 및 실험결과와 비교 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 육안 관측 가능한 초기균열은 150kN 전후에서 발생하였으며, FRP bar를 배치하지 않은 ST바닥판은 초기균열 하중이 20%정도 감소하여 FRP bar

가 균열제어에 영향을 미침을 알 수 있었다. ST 바닥판은 RC 바닥판 대비 균열발생 개소가 적고 특정부위에 집중되어 나타났다.

- (2) ST 바닥판과 RC 바닥판 모두 편칭전단 파괴 형상을 보여주었고, FRP bar 보강 ST 바닥판의 최대 파괴하중은 RC 바닥판 대비 10%정도 작게 나타났다. DB24 축하중 대비 약 8배의 파괴강도를 보여주었다. FRP bar를 배치하지 않은 바닥판은 400kN 부근에서 다소 비선형 거동을 하였고 변위 연성 20%, 파괴하중은 13% 감소되었다.
- (3) 바닥판 파괴시 콘크리트 상연 압축응력은 콘크리트 실측 강도에 근접하고 ST 바닥판이 RC 바닥판 보다 20% 정도 작게 나타났다. 바닥판 파괴시 Strap의 응력은 항복응력을 초과하는데 이는 파괴시에 Steel strap도 항복함을 나타낸다.
- (4) FRP bar 배치량(0%, 0.15%, 0.3%)에 따라 FRP bar의 배근량이 적을수록 동일하중 크기에서 Strap의 응력이 증가함을 알 수 있으며, 최소 0.15% FRP bar만 배치하여도 구조적 안전성 및 사용성 측면에서 충분히 안정적인 거동을 보여준다.
- (5) 200만회 반복하중 재하후 2.5mm의 잔류 처짐이 발생하였고, 콘크리트 압축응력은 정하중 대비 86%, Strap 인장응력은 200% 정도 증가함을 알 수 있었다. 향후 실 차륜하중 모사를 위하여 운하중 주행시험기를 이용한 피로실험과 ST 바닥판의 피로특성을 고려한 설계 검증 등이 필요한 것으로 사료된다. 균열폭은 정하중 대비 65% 증가하였으나 상시 설계하중(130kN)에서의 균열폭은 0.2mm 이내에서 거동함으로써 장기적으로도 우수한 균열 제어 능력을 보여주었다.
- (6) Strap의 횡구속 효과와 바닥판의 파괴형상을 포물선으로 가정하여 제한한 ST 바닥판의 편칭전단강도 예측식은 실험값 대비 4%정도 오차율로 비교적 정확하게 실측 강도를 예측하였다.

참고문헌

1. 국토해양부, 도로교설계기준, 한국도로교통협회, 2010.
2. 이용우, 황훈희, “단순트러스 모델에 의한 철근콘크리트 교량 바닥판의 편칭전단강도”, 대한토목학회논문집, 제28권 2A호, 2008, pp.187-196.
3. 조창빈, 김병석, 황훈희, 최경규, 최석환, “UHPC 바닥판 슬래브의 뚫림전단강도”, 구조물진단학회지, 제15권 4호, 2011,

pp.221-231.

4. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, Sect. 5.7.2, 2007.
5. ACI Innovation Task Group 3, “Report on Bridge Decks Free of Steel Reinforcement”, ACI, ITG-3-10, 2004.
6. Azad, A. K., Baluch, M. H., Abbasi, M. S. and Kaiser, K., “Punching Capacity of Deck Slabs in Girder-Slab Bridges”, ACI Structural Journal, vol. 91, No. 6, 1994, pp.656-662.
7. Bakht, B. and Mufti, A., “FRC Deck Slabs Without Tensile Reinforcement”, Concrete International, 1996, pp.50-55.
8. Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC), Section 16, Fibre-Reinforced Structures, 1998, pp.688-706.
9. Graddy, J. C., Kim, J., James, H., Whitt, N., Burns, N. H. and Klingner, R. E., “Punching Shear Behavior of Bridge Decks under Fatigue Loading”, ACI Structural Journal, vol. 99, No. 3, 2002, pp.257-266.
10. Hassan, T. K., Rizkalla, S. H., “Punching Shear strength of GFRP Reinforcing Deck Slabs in Slab-Girder Bridges”, 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2004.
11. Khanna, O. S., Mufti, A. A. and Bakht, B., “Experimental Investigation of the Role of Reinforcement in the Strength of Concrete Deck Slabs”, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 27, No. 3, 2000, pp.475-480.
12. Kinnunen, S. and Nylander, H., “Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement”, Transactions 158, Royal Institution of Technology, Stockholm, No. 158, 1960.
13. Maeda, Y. & Matsui, S., “Punching Shear Equation of Reinforced Concrete Slabs”, Journal of JSCE, No. 348/V-1, 1984, pp.133-141 (in Japanese).
14. Mufti, A. A., Bakht, B. and Newhook J. P., “Precast Concrete Decks for Slab-on-Girder System : A New Approach”, ACI Structural Journal, vol. 101, No. 3, May-June, 2004, pp.395-402.
15. Mufti, A. A., Newhook, J. P., “Punching Shear Strength of Restrained Concrete Bridge Deck Slabs”, ACI Structural Journal, vol. 95, No. 4, July-August, 1998, pp.375-p381.
16. Muttoni, A., “Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement”, ACI Structural Journal, vol. 105, No. 4, 2008, pp.440-450.
17. Salem, A. H., El-Aghoury, M., A., Moustafa, T. S. and Ezzeldin Y., “Finite Element Modelling of Composite Steel-ree Deck Bridges”, Development in Sort and Medium Span Bridge Engineering, 2002, pp.57-64.
18. Sukrawa, M., “Retrofitting Bridge Decks Using Additional Lateral Restraints(An Experimental Investigation)”, Symposium ke-4 FSTPT, Udayana Bail, 2 November, 2001, pp.1-11.
19. Youn, S. G., Chang, S. P., “Behavior of Composite Bridge Decks Subjected to Static and Fatigue Loading”, ACI Structural Journal, vol. 95, No. 3, 1998, pp.249-258.

(접수일자 : 2012년 6월 18일)

(수정일자 : 2012년 8월 13일)

(심사완료일자 : 2012년 8월 16일)

요 지

무철근 교량 바닥판은 콘크리트 내부의 철근을 없애고 거더를 Strap으로 횡구속시켜 Arching action을 극대화시킨 교량 바닥판이다. 본 연구에서는 무철근 바닥판의 균열제어를 목적으로 FRP bar의 배치량을 변수로 하여 내하력과 균열, 연성도, 파괴시 응력수준 등을 판단하여 FRP bar 최소 배치량을 제시하였다. 실험결과 Steel strap 무철근 바닥판은 최소 0.15% FRP 보강근만 배치하여도 내하력과 연성이 확연히 향상됨을 확인하였다. FRP bar를 보강한 무철근 바닥판에 대하여 피로실험을 수행하였으며 200만회 반복하중 재하후 균열, 잔류 처짐 등에서 장기 사용성에 문제가 없음을 확인하였다. 교량 바닥판은 대체로 편칭전단 파괴를 하며 2방향 슬래브의 전단강도식을 적용할 수 있으나 ACI, AASHTO 등에서는 바닥판의 비선형 파괴형상과 횡구속에 의한 Arching 효과를 명확히 고려하지 못하기 때문에 실제 파괴강도보다 과소평가 한다.

본 연구에서는 Steel strap 바닥판의 실제 파괴형상과 Strap에 의한 횡구속도를 고려한 편칭전단강도식을 제안하였으며 이는 실험결과와도 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주었다.

핵심 용어 : 콘크리트 교량바닥판, 무철근, Steel strap, FRP bar, 편칭전단
