

80 MPa급 고강도 콘크리트를 적용한 RC 바닥판의 피로 성능 평가

배재현 · 황훈희* · 유동민 · 박성용*

한국도로협회 · *한국건설기술연구원

(2017. 7. 17. 접수 / 2017. 8. 3. 수정 / 2017. 8. 11. 채택)

Evaluation of Fatigue Performance of RC Deck Slabs by 80 MPa High-Strength Concrete

Jae-Hyun Bae · Hoon-Hee Hwang* · Dong-Min Yoo · Sung-Yong Park*

Korea Road Association

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received July 17, 2017 / Revised August 3, 2017 / Accepted August 11, 2017)

Abstract : Recently, the use of high-strength concrete is increasing due to the trend of constructing high-rise and long span structures. The benefit of using the high-strength concrete is that it increases the durability and strength while it reduces the cross-sectional area of the bridge deck slabs. Moreover, it offers more safety as these bridge deck slabs applying high-strength requires strict structural performance verification. In this study, the fatigue performance of the bridge deck slabs applying 80 MPa high-strength concrete was verified through various experiments. The experimental results showed that the specimens satisfy the conditions of flexural strength, punching shear strength, deflection and cracking. In conclusion, the bridge deck slabs designed by 80 MPa high-strength concrete are enough safe despite of its low thickness.

Key Words : 80 MPa high-strength concrete, RC deck slabs, flexural strength, punching shear strength, fatigue performance test

1. 서론

고강도 재료의 적용은 구조물의 거동별 특성에 따른 효율을 높여주고, 재료, 시공, 품질 관리에서 유리하게 작용하며 탄소 배출량의 감소 효과로도 이어지는 장점을 가지고 있다. 또한, 고강도 재료의 적용은 단면의 크기를 줄일 수 있기 때문에 보다 경제적인 설계가 가능하게 한다. 이에 최근에는 교량이나 고층 건물 등의 인프라시설에 고강도 재료를 적용하고자 하는 많은 연구가 이루어지고 있다.

그 중 교량의 바닥판은 차량하중이 직접 전달되고 설계 등 부식성 환경에 직접 노출되는 교량의 주요 부재로서 상대적으로 손상이 많이 발생하며, 보수, 보강 등 교량의 성능 개선 및 유지를 위한 조치를 취하기까지의 수명이 가장 짧은 것으로 보고되고 있다^{1,2)}. 따라서 교량 바닥판에 고강도 재료를 적용하면 내구성을 높여 부재의 수명을 늘릴 수 있을 뿐만 아니라, 바닥판 두

께 감소에 따른 교량의 경량화를 통하여 자원 절감 및 공사비 절감 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

관련 연구로는 180 MPa급 초고성능 콘크리트를 활용한 사장교용 바닥판에 대하여 최적 단면 설계 프로세스³⁾, 연결부의 휨⁴⁾ 및 전단성능⁵⁾ 평가 등이 이루어졌으며, 최근에는 압축강도 80 ~ 180 MPa급의 고품질 성능 맞춤형 콘크리트가 개발⁶⁾되고 있는 실정이다.

이러한 고성능 콘크리트 개발이 진행됨에 따라 최근에는 보다 합리적인 바닥판 최소두께에 대한 연구들이 이뤄지고 있다. 배재현 등은 고강도 콘크리트 적용 시 바닥판의 휨, 편칭강도 및 처짐을 검토하여 바닥판의 최소두께식을 제안⁷⁾하였으며, 이를 기반으로 고강도 콘크리트 바닥판의 두께를 기존 대비 약 10% 감소시킨 바닥판에 대하여 정적 성능을 실험적으로 검증⁸⁾하였다.

그러나 도로교의 바닥판은 차량하중을 직접 지지하는 구조부재로서 차량의 대형화 및 통행량 증가, 피로

* Corresponding Author : Hoon Hee Hwang, Tel : +82-02-3490-1041, E-mail : poonhee@kroad.or.kr
R&D Center, Korea Road Association, 113 Jungdaero, Songpa-gu, Seoul 05728 Korea,

손상 및 재료열화 등이 복합적으로 작용하여 파손이 발생⁹⁾하기 때문에 피로에 의한 성능 검증이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 80 MPa급 고강도 콘크리트 바닥판의 두께를 기존 대비 약 10% 감소시킨 바닥판에 대하여 피로 성능 검증을 실험을 통하여 평가하였으며, 선행 연구⁸⁾에서 검증된 정적 성능과 피로하중 누적 후 정적 성능에 대하여 비교, 분석하였다.

2. 구조실험

2.1 실험체

80 MPa급 고강도 콘크리트를 적용한 바닥판의 피로 성능을 검증하기 위하여 2.8 m(폭) × 4 m(길이)를 갖는 2거더 형식의 바닥판 실험체를 제작하였다. 바닥판 두께는 현행 기준보다 얇은 두께로 성능을 확보할 수 있는 것으로 보고된 기존 연구^{7,10,12)}를 참고하여 200 mm로 적용하였다. 이는 현행 설계기준¹¹⁾에 제시되어 있는 기존 RC 바닥판 최소두께 규정의 약 10% 감소된 수준으로 PSC 바닥판의 최소두께 규정을 참고하여 실험체에 적용하였다.

실험체는 선행 연구⁸⁾의 정적 실험 결과와 상대비교를 위하여 실험체 제원 및 제반 여건을 동일하게 적용하였다(Table 1, Fig. 1). 여기서 f_{ck} 는 콘크리트 설계기

Table 1. Variables of specimens

Specimen name		SC-H200F-1	SC-H200F-2
Material	f_{ck}	80 MPa	80 MPa
	f_y	500 MPa	500 MPa
Section	H	200 mm	200 mm
	d	162 mm	162 mm
	A_s	6.67 - H16= 1324 mm ²	5 - H16= 993 mm ²
	ρ	0.00817	0.00613
	s	150 mm	200 mm

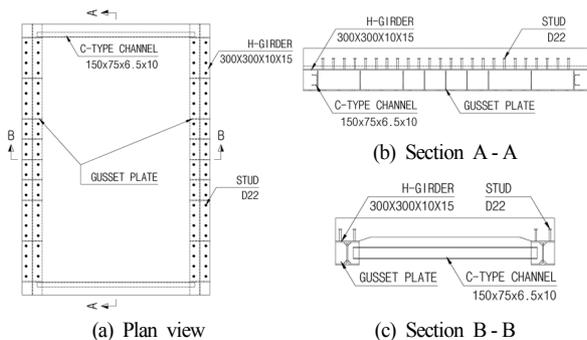


Fig. 1. Detail of specimens.

Table 2. Basic mix proportions of concrete

W/B (%)	W (kg)	S/a (%)	SP/B (%)	Unit Mass(kg/m ³)				
				OPC	BS	FA	S	G
23.6	165	45	1.0~1.5	420	224	56	677	828

W(water), B(binder), S(sand), G(gravel), SP(superplasticizer), a(aggregate), OPC(ordinary portland cement), BS(blast slag), FA(fly ash)

준압축강도, f_y 는 철근의 항복강도, H 는 바닥판 최소 두께, d 는 바닥판 유효깊이, A_s 는 철근량, ρ 는 철근비, s 는 철근 간격이다.

실험체 설계는 최소두께 규정을 제외하고 현행 설계 기준¹¹⁾을 만족하도록 설계하였다. 또한, 설계사 및 시공사의 실무자 자문을 통하여 최소두께를 제외한 바닥판 실험체의 단면 상세(철근 간격, 피복두께, 철근비 등)를 실제 교량에서 적용할 수 있는지에 대한 여부를 검토하여 실험체에 적용하였다.

Table 2에 콘크리트 기본배합표를 나타내었다. 또한, 실험체와 동일한 조건으로 양생된 공시체를 제작하여 일축압축실험을 실시하였다. 실험 결과 압축강도는 평균 87.2 MPa로 실험체 콘크리트 설계압축강도(80 MPa)를 충분히 만족하는 결과를 보였다.

실험체는 실제 교량의 거동을 모사하기 위하여 H빔(H-300×300×10×15) 형태의 강거더를 부착하였다. 강거더의 변형을 막기 위하여 수직보강재 및 수평브레이싱(□-150×75×6.5×10)을 설치하여 보강하였으며, 강거더와 콘크리트 사이에는 전단연결재(D19)를 부착하여 완전 합성시켰다.

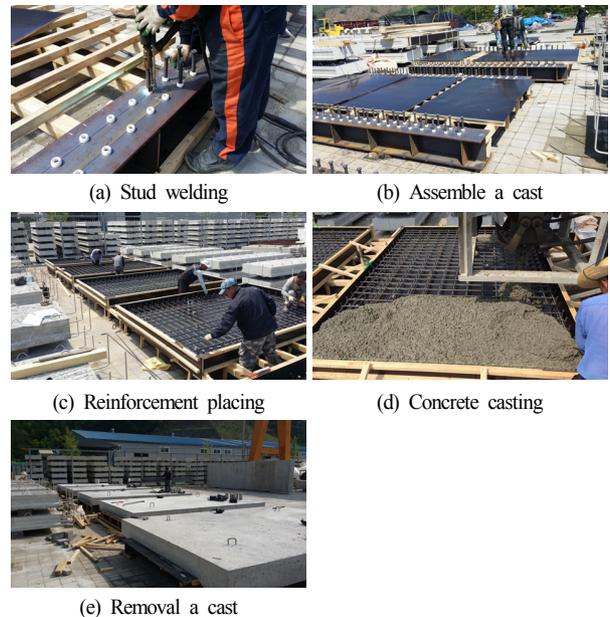


Fig. 2. Manufacture of the specimens.

실험체 제작 순서는 거더 거치, 수직보강재 및 수평 브레이싱 설치, 전단연결재 용접, 거푸집 조립, 철근 조립 및 배근, 콘크리트 타설 및 양생, 탈형 순으로 이루어졌다(Fig. 2). 전단연결재 용접 시에는 스테드 용접법을 적용하여 거더의 변형을 최소화하였으며, 콘크리트는 증기양생을 실시하였다.

2.2 피로하중 결정

피로 성능 검증 실험은 여건 상 고정점 피로하중 재하 형식으로 계획하였기 때문에 그에 상응하는 피로하중 크기를 결정하였다. 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾의 바닥판 활하중 휨모멘트 산정식에 바닥판 실험체 지간을 적용하여 활하중 휨모멘트를 산정하고, 유한요소해석을 통하여 바닥판 모델에 활하중 휨모멘트 수준의 휨모멘트가 발생할 때의 운하중 크기를 산정하였다(Fig. 3).

산정 결과, 바닥판 설계휨모멘트(36.88 kN·m) 수준의 바닥판 실험체에 발생하는 운하중 크기는 약 140 kN으로 피로 성능 검증 실험 시 하중의 범위를 20 kN(2 tonf) ~ 140 kN(14 tonf)로 결정하였다.

2.3 구조실험

구조실험은 총 2개의 단계로 실시하였다. 첫 번째 단계로는 2.2에서 결정된 피로하중으로 200만회를 재하하였으며, 두 번째 단계는 피로하중 누적 후의 잔류

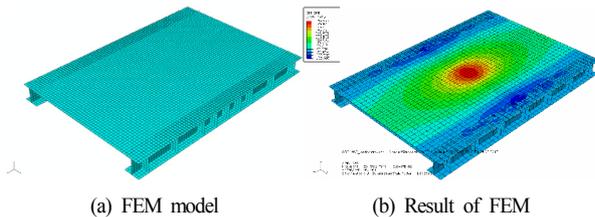


Fig. 3. FEM.

강도를 측정하기 위하여 정적하중으로 실험체가 파괴 될 때까지 하중을 재하하였다. 피로하중 재하 실험 및 잔류강도 측정 실험의 하중은 바닥판 상면 중앙부에 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾ 표준트럭하중의 운하중 접지면적(577 mm × 231 mm)에 재하하였으며, 하중 재하 시 가력기에 의한 응력 집중 현상이 발생되지 않게 재하블록과 실험체 사이에 운하중 크기의 고무패드 를 설치하였다. 지지조건은 강거더 하부플랜지에 구멍을 뚫어 구조실험동 프레임에 볼트로 고정하였다.

피로하중 재하 실험은 1,000 kN 용량의 동적 가력기를 이용하여 총 200만회까지의 반복하중을 가하였으며, 각각 1회, 1천회, 1만회, 10만회, 100만회, 200만회의 하중 단계마다 처짐, 변형률, 균열 등을 측정하여 피로누적에 따른 손상 진행 여부를 평가하였다. 피로하중 속도는 약 2 ~ 3 Hz 수준으로 재하하였다.

잔류강도 측정 실험은 3,500 kN 용량의 정적 가력기를 사용하여 하중을 파괴 시까지 점진적으로 증가시키면서 처짐, 변형률, 균열 등을 측정하였다. 하중은 하중 제어 방식으로 재하하였으며, 하중속도는 초기균열 발생 시(약 140 kN)까지는 10 kN/min 속도로, 초기균열 발생 후 파괴 시까지는 20 kN/min 속도로 재하하였다.



Fig. 4. The whole view of specimen(SC-H200F-1).

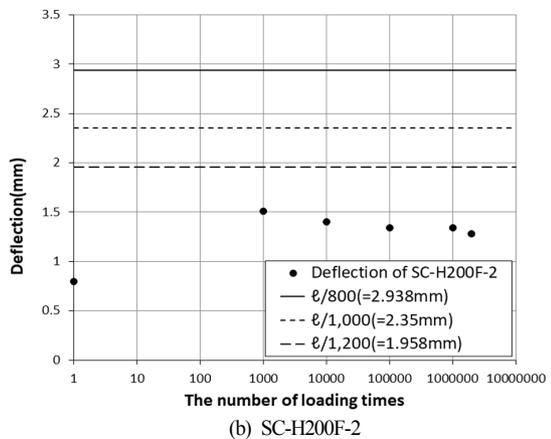
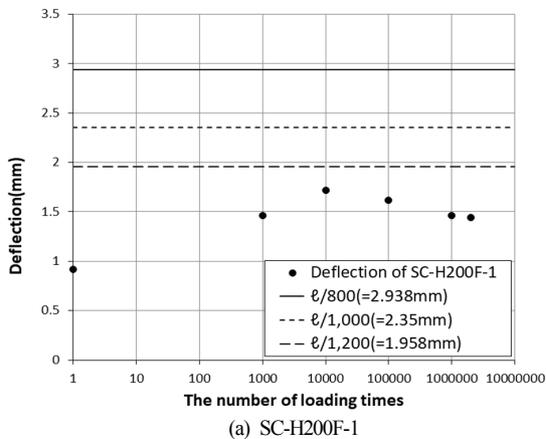


Fig. 5. Deflection at the number of fatigue loading times.

3. 실험 결과 및 비교

3.1 피로하중 재하 실험 결과

200만회의 피로하중 재하 시까지 하중 단계별로 바닥판 실험체에 발생한 처짐량을 측정하였다.

한편, 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾에서는 교량의 처짐을 단순 및 연속경간일 때, 사용하중과 충격에 의한 처짐은 지간의 1/800, 보행자도 사용하는 도시지역의 교량의 경우 지간의 1/1,000, 보도부가 매우 중요한 교량의 경우 지간의 1/1,200까지 제한한다고 명시되어 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 피로하중 단계별로 바닥판 실험체에 발생한 처짐량은 설계기준의 처짐 제한을 모두 만족하는 수준으로 나타났다.

또한, 피로하중 단계별 하중 재하 시 바닥판 실험체에 발생한 최대균열폭은 SC-H200F-1, SC-H200F-2 실험체에서 각각 0.0744 mm, 0.0968 mm가 발생하여 설계기준¹¹⁾의 한계균열폭(0.3 mm)을 만족하는 수준으로 나타났다.

3.2 잔류강도 측정 실험 결과

3.2.1 최대하중 및 파괴형상

200만회의 피로하중 누적 후 바닥판에 남아있는 잔류강도를 측정하기 위하여 정적하중을 파괴 시까지 재

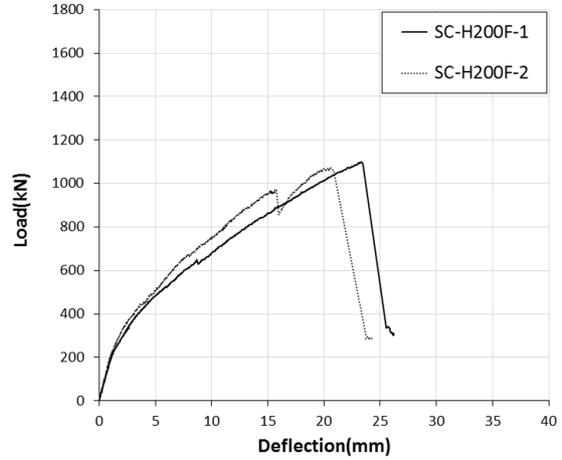


Fig. 6. $P-\delta$ Curve(position of load).

하한 결과, SC-H200F-1 실험체의 최대하중은 1098.06 kN, 최대하중 발생 시 바닥판 중앙부의 처짐은 23.36 mm로 나타났으며, SC-H200F-2 실험체의 경우 최대하중은 1073.8 kN, 최대하중 발생 시 바닥판 중앙부의 처짐은 20.6 mm로 측정되었다.

최종 파괴는 바닥판 실험체 두 개 모두 펀칭전단에 의한 파괴형태를 보였으며, 펀칭전단파괴의 전형적인 파괴 형상인 펀칭콘이 바닥판 상·하면을 통하여 나타

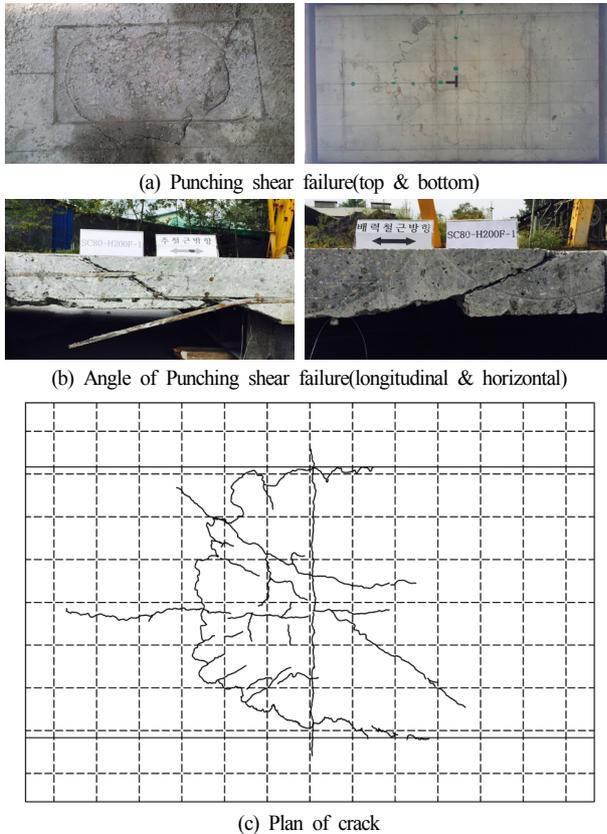


Fig. 7. Punching shear failure mode of SC-H200F-1.

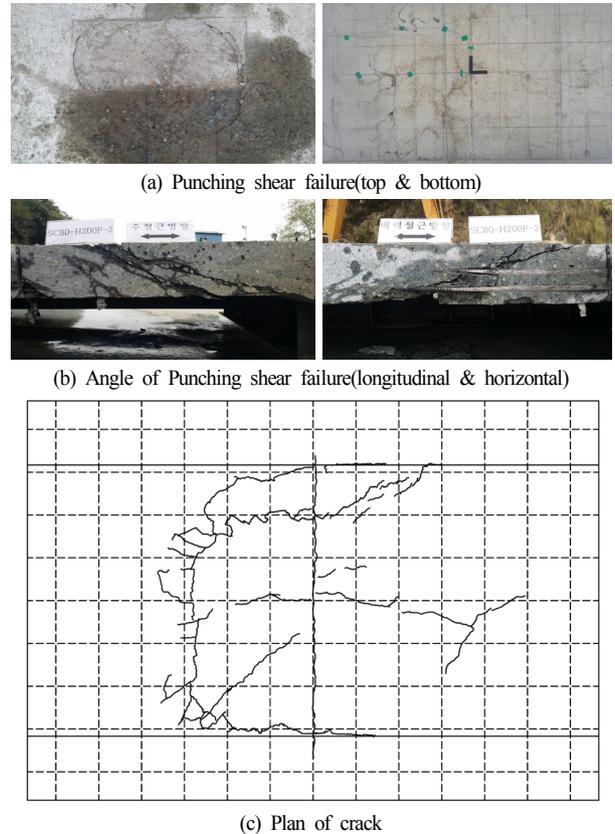


Fig. 8. Punching shear failure mode of SC-H200F-2.

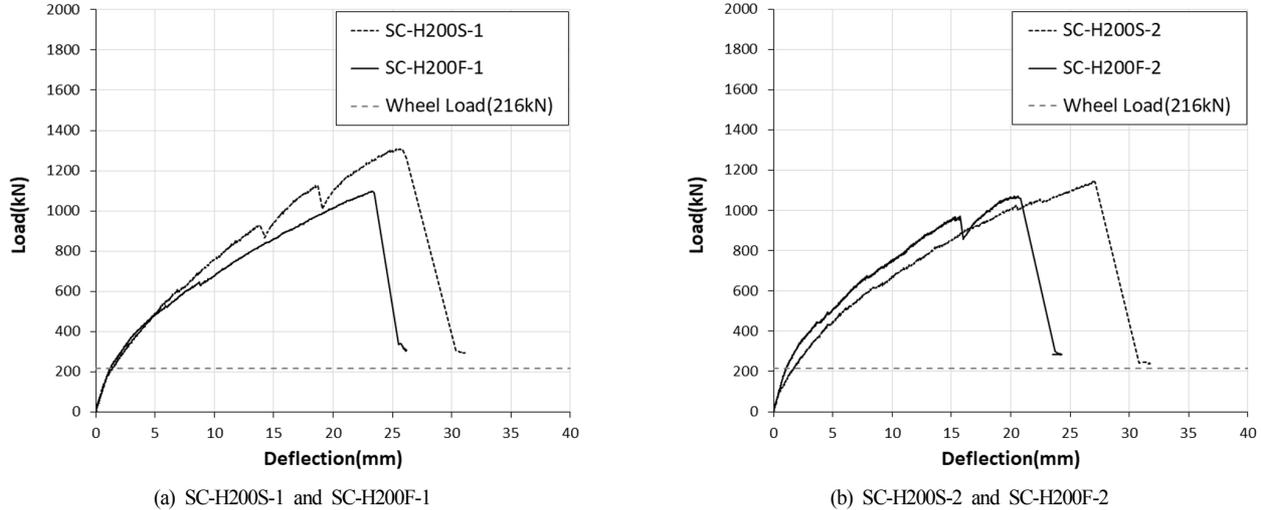


Fig. 9. Comparison of maximum load and wheel load(consider impact factor and load factor), specimen SC-H200S-1(2) and SC-H200F-1(2).

났다. 또한, 바닥판 절단면에서도 편칭콘 형태를 발견할 수 있었다(Fig. 7, 8).

3.2.2 강도 검토

200만회의 피로하중 누적 후 측정된 잔류강도 측정 실험의 최대하중과 피로하중 누적이 없는 상황에서 정적하중으로 파괴까지 재하한 선행 연구⁸⁾의 최대하중을 비교하였다. 비교 결과, 피로 누적 후 측정된 최대하중은 피로 누적이 없는 실험체(SC-H200S-1, SC-H200S-2)에 비해 각각 약 84%, 약 94% 수준으로 나타났다(Fig. 9, Table 3).

또한, 실제 교량에서 발생할 것으로 기대되는 운하중에 의한 전단력과 실험 결과 최대하중을 비교하였다.

Table 3. Comparison of static maximum load and residual maximum load

Specimen name	Deflection at Maximum load	①	②	① / ②
		Static maximum load	Residual maximum load	
SC-H200S-1	25.66 mm	1309.21 kN	-	0.84
SC-H200F-1	23.36 mm	-	1098.06 kN	
SC-H200S-2	27.08 mm	1146.11 kN	-	0.94
SC-H200F-2	20.60 mm	-	1073.80 kN	

여기서 운하중에 의한 전단력은 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾ 표준트럭하중(KL-510)의 최대 운하중 크기(96 kN)에 충격계수(0.25)와 극한한계상태 하중계수(1.8)를 적용하여 216 kN으로 산정하였다. 비교 결과, 200만회 피로하중 누적 후 바닥판에 발생한 잔류하중은 운하중에 의한 전단력에 비해 각각 5.08배(SC-H200F-1), 4.97배(SC-H200F-2)의 수준으로 나타났다(Fig. 9, Table 4). 이러한 결과로 인하여 80 MPa급 고강도 콘크리트를 적용한 바닥판은 최소두께를 약 10% 감소시키고 피로하중이 누적되어도 전단에 대하여 충분히 안전할 것으로 판단된다.

또한, 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾에서 규정하고 있는 전단철근이 없는 슬래브 또는 기초판의 뿔뿔전단하중과 비교 결과, 바닥판에 발생한 잔류하중은 예상뿔뿔전단하중에 비해 각각 1.24배(SC-H200F-1), 1.21배(SC-H200F-2)의 결과를 보였다(Table 4).

3.2.3 사용성 검토

고강도 콘크리트를 적용한 바닥판의 사용성을 검토하기 위하여 사용한계상태 수준에서 발생하는 처짐량 및 균열폭을 확인하였다. 사용한계상태 수준의 하중은 2.2에서 피로하중을 결정하였듯이 동일한 바닥판 모델

Table 4. Comparison of residual maximum load and wheel load, expected punching shear load

Specimen name	①	②	③	① / ②	① / ③
	Residual maximum load	Wheel load*	Expected punching shear load		
SC-H200F-1	1098.06 kN	216 kN	887.61 kN	5.08	1.24
SC-H200F-2	1073.80 kN			4.97	1.21

*Wheel load = 96 kN × 1.25(impact factor) × 1.8(load factor)

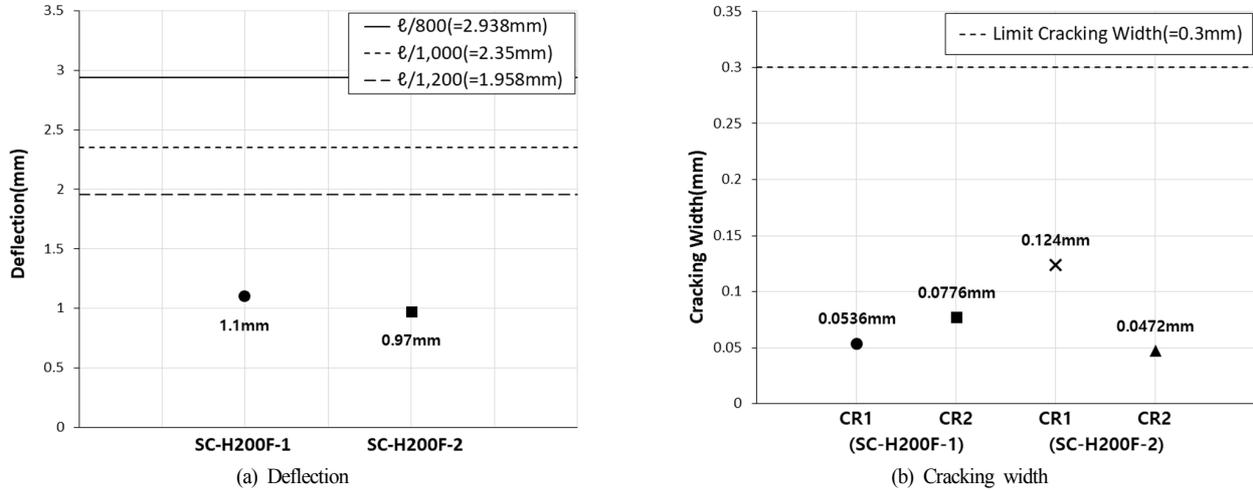


Fig. 10. Deflection and cracking width of specimens.

의 유한요소해석을 통하여 사용한계상태 하중조합으로부터 유발되는 모멘트 발생 시 바닥판에 발생하는 축하중으로 환산하였다. 그 결과 사용한계상태 수준의 하중은 약 198.96 kN으로 산정되었다.

200만회의 피로하중 재하 후 실시한 잔류강도 측정 실험 결과, 사용한계상태 수준에서 발생하는 처짐량은 SC-H200F-1, SC-H200F-2 실험체에서 각각 1.1 mm, 0.97 mm가 발생하여 설계기준¹¹⁾의 처짐 제한(3.1 참조)을 만족하는 것으로 나타났다.

또한, 사용한계상태 수준에서 바닥판 실험체에 발생한 균열폭은 0.0472 ~ 0.124 mm로 설계기준¹¹⁾의 한계 균열폭(0.3 mm)의 약 15.7 ~ 41.3% 수준으로, 현행 설계기준¹¹⁾을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문은 80 MPa급 고강도 콘크리트를 적용한 바닥판의 피로성능을 검증하기 위하여 바닥판 실험체에 200만회의 피로하중을 재하하였으며, 피로하중이 실험체에 누적된 후 잔류강도를 측정하여 바닥판의 성능을 평가하였다. 그로 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 200만회의 피로하중을 재하하기까지 하중 단계별 (1회, 1천회, 1만회, 10만회, 100만회, 200만회)로 실험체의 발생한 처짐량을 확인한 결과, 설계기준의 처짐 제한을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, SC-H200F-1 실험체는 1만회(SC-H200F-2 실험체는 1천회)의 피로하중 재하 이후에 측정된 처짐량이 증가하지 않은 결과로 볼 때 피로 누적에 의한 뚜렷한 손상 또는 성능 저하가 유발되지 않은 것을 알 수 있다. 또한, 200만회의 피로하중이 재하되면서 바닥판 실험체에 발생한 균열

폭은 설계기준의 한계균열폭보다 낮은 수준인 것을 확인하였다.

2) 200만회 피로하중 재하 후 실험체가 파괴될 때까지 정적 하중을 재하한 결과, 바닥판 실험체 두 개 모두 편칭 전단에 의한 최종 파괴형태를 보였으며 편칭전단파괴의 전형적인 형상인 편칭콘이 형성되었다. SC-H200F-1 실험체의 최대하중 및 최대하중 발생 시 처짐은 1098.06 kN, 23.36 mm로 측정되었으며, SC-H200F-2 실험체의 경우 1073.8 kN 발생 시 중앙부의 처짐은 20.6 mm로 측정되었다.

3) 피로하중 재하 후 잔류강도 측정 실험 결과 실험체에 발생한 최대하중은 선행 연구⁸⁾에서 측정된 최대하중에 비하여 각각 84%(SC-H200F-1), 94%(SC-H200F-2) 수준으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 200만회의 피로하중 누적 후에도 고강도 콘크리트 적용 바닥판은 설계에서 요구되는 극한한계상태 하중조합으로 유발되는 하중에 비하여 약 3.16배(SC-H200F-1), 3.09배(SC-H200F-2)의 수준으로 나타났다. 또한, 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾의 설계뚫림전단하중에 대해서는 약 1.24배(SC-H200F-1), 1.21배(SC-H200F-2)의 결과를 보였다.

4) 잔류강도 측정 실험 결과 사용한계상태 수준의 하중에서 실험체에 발생한 처짐량은 SC-H200F-1, SC-H200F-2 실험체에서 각각 1.1 mm, 0.97 mm가 발생하여 도로교설계기준(한계상태설계법)¹¹⁾의 처짐 제한을 만족하는 것으로 나타났다. 실험체에 발생한 균열폭 또한 약 0.0472 mm ~ 0.124 mm로, 설계기준의 한계균열폭을 만족하는 것으로 나타났다.

본 논문에서 수행된 80 MPa급 고강도 콘크리트를 적용한 바닥판은 현행 설계기준에서 제한하고 있는 두께보다 적은 두께임에도 불구하고 휨, 뚫림전단, 처짐,

균열에서 충분히 만족하는 결과를 보였다. 또한, 선행 연구⁸⁾에서 수행된 정적 실험 결과 최대하중에 비하여 적은 하중의 결과가 나왔음에도 불구하고 충분히 안전한 결과를 보였으며, 설계기준의 제한값을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 80 MPa 급 고강도 콘크리트를 적용한 바닥판은 두께를 200 mm로 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

다만, 바닥판은 교량의 차량하중이나 체수에 의한 손상, 겨울철 염화물 침투 등이 직접적으로 발생하는 부재이므로, 보다 다양하고 경험적인 연구가 진행되어야 현재 적용되는 교량보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글: 이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. W. Suh, J. Y. Rhee, B.S. Ku, H. S. Kim, J. C. Kim and D. C. Shin, "An Experimental Study of High-performance Concrete Bridge for Field Application", Korea Concrete Institute, 2007.
- 2) Transportation Research Board 2013 Executive Committee, "High-Performance/High-Strength Lightweight Concrete for Bridge Girders and Decks", NCHRP Report 733, 2013.
- 3) H. H. Hwang, D. M. Yoo, S. Y. Park and B. S. Kim, "Optimized Design of UHPC Bridge Deck Slab for Hybrid Cable-stayed Girder Bridge", Proceeding of 13th REAAA Conference, pp. 4-19, 2009.
- 4) H. H. Hwang, I. S. Yeo and K. H. Cho and S. Y. Park, "Evaluation of Flexural Strength for UHPC Deck Joints with Lap-Spliced Reinforced Steel Bar", Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.15, No.6, pp. 92-99, 2011.
- 5) D. M. Yoo, H. H. Hwang, S. T. Kim and S. Y. Park, "An Experimental Study on the Shear Connection for UHPC Deck Bridge", Composites Research, Vol. 24, No. 5, pp. 29-33, 2011.
- 6) B. S. Kim, K. T. Koh, S. Y. Park and K. J. Jung, "Development of SUPER Concrete with Compressive Strength of 80 ~ 180 MPa and its Applications", The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 62, No. 11, pp. 10-24, 2014.
- 7) J. H. Bae, D. M. Yoo, H. H. Hwang, S. T. Kim, "Minimum Thickness of Long-Span RC Deck Slabs for 2-girder Bridges Designed by 80 MPa Concrete", Journal of the Korean Society of Safety, Vol.29, No.5, pp. 97-103, 2014.
- 8) J. H. Bae, H. H. Hwang, S. Y. Park and K. H. Joh, "Evaluation of Structural Performance of RC Deck Slabs by High-Strength Concrete", Journal of the Korean Society of Safety, Vol.31, No.3, pp. 89-95, 2016.
- 9) Y. J. Kim, "Crack Damage and Durability Improvement of Highway Bridge RC Decks", The Magazine of Korea Infrastructure Safety Corporation, 1999.
- 10) W. J. Park and H. H. Hwang, "Minimum Thickness of Long Span RC Deck Slabs for Composite 2-girder Bridges Designed by KL-510 Load Mode", Journal of the Korean Society of Safety, Vol.29, No.3, p. 72-78, 2014.
- 11) Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, Korean Highway Bridges Design Code(Limite State Design Method), Korea Road Association, 2015.
- 12) H. H. Hwang, C. B. Joh, J. W. Kwark and Y. W. Lee, "Minimum Design Thickness of Prestressed Concrete Deck Slabs for Composite Two-Girder Bridges", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.26, No.1A, pp. 183-190, 2006.