

혼화재 사용에 따른 콘크리트 시험체의 피로성능 평가

김두환^{*} · 백경수

서울과학기술대학교 공과대학 건설공학부
(2010. 6. 28. 접수 / 2010. 10. 5. 채택)

The Fatigue Performance Evaluation of Concrete Specimen by Using Mineral Admixture

Doo-Hwan Kim^{*} · Kyung Su Baek

School of Civil-Engineering, Seoul National University of Science & Technology
(Received June 28, 2010 / Accepted October 5, 2010)

Abstract : The surfacing of bridge-decks are object to secure trafficability and to protect bridge face from impact load of traffic volume and other external conditions. But the deformation of pavements and cracks happen due to the damage of the bridge-decks surfacing from the increase of the traffic, short maintenance period and continuous vibration of bridge. This test is to make the 3-type high performance concrete that has different mixing ratio and is added the blast furnace slag, fly ash and silica respectively, and to compare 3-type high performance concrete of normal high strength concrete of 400kgf/cm² strength through the static loading test and fatigue test. And test specimen is united floor slab and pavement for the durability of bridge.

Key Words : high strength concrete, pavement slab, fatigue performance evaluation, fly ash, fatigue test

1. 서론

국내에서 건설되어 지고 있는 콘크리트 슬래브의 경우 차량하중을 반복적으로 받기 때문에 피로 손상이 발생하며 심한 경우 국부적으로 함몰되는 편칭전단파괴 등이 발생되어지기 때문에 높은 하중 저항성능과 피로내구성을 필요로 한다¹⁾.

지금까지 비교적 경제적이고 용이한 시공 등의 이유로 교량 슬래브에 널리 적용된 철근 콘크리트 슬래브에 대해 최근 자동차 반복하중에 따른 손상도의 문제점이 지적되고 있으며, 이와 병행하여 교량의 구조형식도 점차 주형 구조를 간소화하는 소수주형교가 제안·적용되는 추세에 있다²⁾. 따라서, 미래의 교량 슬래브 형식은 날로 증가하는 자동차의 반복하중과 소수주형교의 장시간화에 대응할 수 있도록 높은 하중저항성능과 피로내구성을 갖추고 합리적 시공성, 건설비 저감 등이 조건을 충족해야한다.

본 연구에서는 기존의 문제점을 극복하고 콘크

리트 슬래브의 품질 향상 및 경제성 향상을 위한 기술확보를 위해 서로 다른 혼화재를 가진 고성능 콘크리트 시험체와 보통 콘크리트의 품질성상을 객관적으로 평가할 수 있는 자료와 실험결과를 비교·분석하는 것을 연구목적으로 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 시험체의 치수 및 재료적 특성³⁾

철근은 KSD 3504에 규정되어 있는 이형철근 D13(운도수축철근)과 D16(주철근)을 사용하였으며 철근콘크리트 시험체는 25cm 슬래브 위에 콘크리트 포장을 5cm 추가하여 타설한 부재이며 정적재하 시험용과 피로시험용 및 예비용으로써 4개씩 종류별로 총 12개를 제작하였으며 양생포를 이용하여

Table 1. Specimen Size

치수(mm)			면적(m ²)
Width	Length	Height	
1,700	3,500	300	0.51
개당무게(kN)		단면2차모멘트(cm ⁴)	단면계수(cm ³)
43,708		382,500	25,500

^{*} To whom correspondence should be addressed.
kdh6504@snut.ac.kr

Table 2. Specimen Mixing Ratio

	보통 콘크리트	A Type	B Type	C Type
Gmax(mm)	25	25	25	25
Slump(cm)	12±2	12±2	12±2	12±2
Air(%)	5±1	5±1	5±1	5±1
W/B(%)	0.4	0.4	0.4	0.4
S/a(%)	45	45	45	45
W(kg)	170	170	170	170
C(kg)	425	399.5	341.5	229.5
B(kg)	425	425	425	425
FlyAsh(kg/m ³)	0	0	85	0
GS(kg)	0	0	0	170
S(kg)	755	764	749	827
G(kg)	940	952	933	1031
f _{ca} (28d)	410	454	400	445

동일한 조건으로 습윤양생 하였다. 시험체 치수는 Table 1과 같고, Table 2는 보통콘크리트 및 혼화재 사용에 의한 고성능 콘크리트 A, B, C의 배합비를 나타낸 것이다.

2.2. 하중재하 및 측정 방법⁴⁾

정적재하시험의 경우, 100t급 Actuator를 사용하여 슬래브 중앙부에 일점가력을 실시하였다. 하중 제어 방법은 변위제어로 하중이 급속히 감소할 때까지 가력하였으며, 이후에는 하중제어로 9.8kN씩 재하하여 시험체의 변형형상을 확인하였으며 재하 속도는 2mm/min로 유지하였다.

피로시험의 경우, 100t급 용량의 유압식 피로시험기를 사용하여 실시하였으며 파형은 sine파, 재하 속도는 2.5Hz로 재하하였다. 가력하중은 DB-24하중과 충격계수를 적용하여 최대하중 122.63kN, 최소하중 12.27kN로 하였으며, 응력비는 0.1로 일정하게 하였다.

2.3. 측정위치

처짐 측정은 50mm 용량의 LVDT 변위계를 사용하였으며, 처짐이 가장 크게 발생하는 각 시험체의 지간 정중앙과 양쪽측면에 한 개씩 총 3개를 설치하였고, 변형률 게이지는 Fig. 1~3과 같이 응력

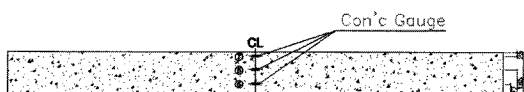


Fig. 1. Side Concrete Gauge Position.

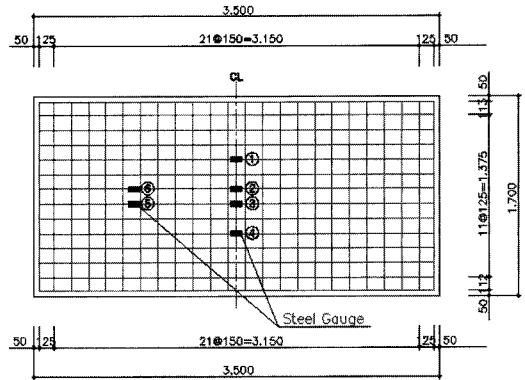


Fig. 2. Steel Gauge Position.

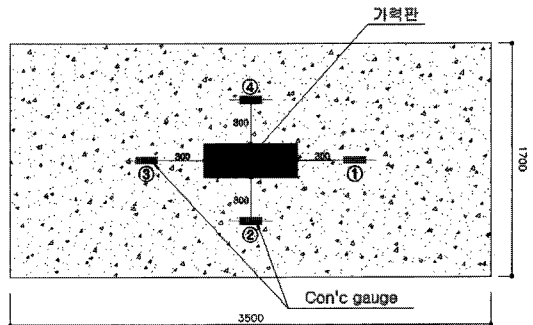


Fig. 3. Upper Concrete Gauge Position.

이 가장 크게 발생될 지점을 시험체 중앙 및 측면, 상부 등에 부착하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 정적재하시험 결과 및 고찰

정하중에 의한 보통 및 혼화재를 사용한 콘크리트의 하중-변위 선도 전체를 비교·분석한 결과는 Table 3과 같고 전체 중 대표적인 것으로 나타내 Fig. 4와 같다.

이를 고찰하여 볼때 혼화재를 사용한 콘크리트 최대하중은 706.32~716.13kN에서 측정되어져 비슷한 값을 보였으나 반면 보통콘크리트의 경우 최대하중은 461.07kN으로 측정되었다.

실험결과 고성능 A Type의 처짐량이 27.3mm로 가장 낮았으며 고성능 B Type 28.5mm, 고성능 C Type 29.0mm 순으로 나타나 고성능 C Type이 동일하중(706.32kN)하에서 가장 컸으며, 보통콘크리트의 경우 461.07kN의 극한 하중에서 18.37mm의 처짐량을 나타내는 것을 알 수 있다.

동일하중(715.4kN)의 경우 고성능 A,B 두 Type의 콘크리트가 중앙에 위치한 변위계를 기준으로 약

Table 3. Behaviors of Specimen

시험체명	보통 콘크리트	고성능 A Type	고성능 B Type	고성능 C Type
최대극한하중	460kN	715kN	715kN	705kN
최대변위 (mm)	좌측	11.50	14.36	14.68
	중앙	18.69	28.50	29.01
	우측	10.16	13.25	14.96
최대 균열폭 (mm)	측면	1.2	0.7	1.0
	역측면	1.0	0.9	1.1
	바닥	1.8	1.4	2.0

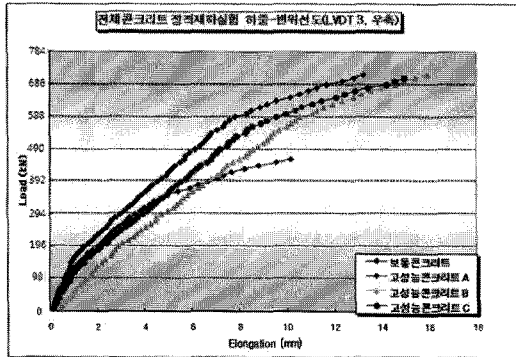


Fig. 4. Specimen Deflection.

11.0mm로 가장 낮은 반면, 보통콘크리트는 15.62mm, 고성능 C Type은 11.22mm의 값으로 가장 큰 처짐값을 나타내었다.

고성능 보통콘크리트의 균열폭은 Table 3을 통해 비교 분석해 본 결과 고성능 A Type을 제외한 나머지 시험체에서의 경우 모두 147.15kN의 하중에서 초기균열이 발생하였으며 이후 하중이 증가함에 따라 균열폭도 비례하여 증가함을 관찰할 수 있었다.

허용균열폭 값인 0.16~0.2mm⁵⁾를 넘는 균열폭은 보통콘크리트를 제외한 시험체 모두 343kN의 하중에, 밀면 중앙부 위에서 측정되어졌다.

보통콘크리트의 경우 극한하중값인 461.07kN에서 최대 1.8mm의 균열폭을 보였으며 고성능 A, B, C 순으로 706.32kN의 하중에서 각각 1.4mm, 2.0mm, 1.6mm의 최대 균열폭 값이 밀면에서 측정되었다.

고성능 C Type의 경우 490.5kN의 하중에서 중앙부에 약 20cm가량의 횡방향 균열이 발생하였다.

정면 및 측면, 밀면 모두 최대하중값에서는 고성능 A Type의 시험체가 가장 작은 균열폭 값을 보이는 것을 알 수 있다.

보통 및 혼화재를 사용한 콘크리트의 역측면 최대 균열폭은 Fig 5와 같다.

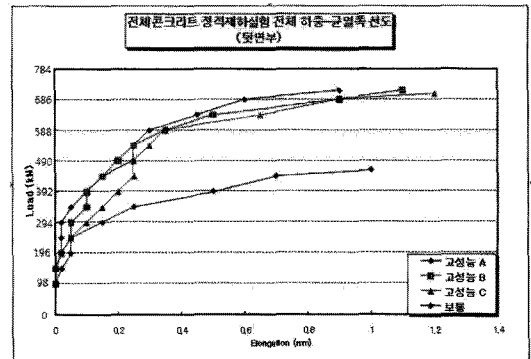


Fig. 5. Specimen Maximum Crack Width.

보통콘크리트와 혼화재를 사용한 콘크리트의 정하중 시험을 비교·분석하기 위해서는 보통콘크리트 시험체가 항복하는 하중값인 343.35~392.4kN의 하중값을 기준값으로 정하기로 하였으며 위치별 최대 변형을 측정결과를 Table 4~5에 나타내었다.

하중값이 362.97kN에서 보통콘크리트가 가장 큰 변형률을 보이는 것을 알 수 있으며 461.07kN의 극한하중에서 항복하는 그래프를 Fig. 6~7에 나타내었다.

고성능 B Type 시험체의 경우 7번 콘크리트 계

Table 4. Maximum Strain of Concrete

	보통 콘크리트	고성능 A Type	고성능 B Type	고성능 C Type
최대변형률 ($E \times 10^{-3}$)	-890.85	-821.59	-813.14	-863.85
Co.1	-553.05	-394.37	-307.98	-433.80
Co.2	-875.59	-802.82	-714.55	-863.85
Co.3	-538.97	-292.96	-359.62	-375.59
Co.4	-890.85	-821.59	-813.14	-741.78
Co.5	-144.60	209.39	-459.16	9.38
Co.6	-157.75	423.47	-44.13	151.17
Co.7	-306.11	-512.68	-163.38	-503.29

Table 5. Maximum Strain of Steel

	보통 콘크리트	고성능 A Type	고성능 B Type	고성능 C Type
최대변형률 ($E \times 10^{-3}$)	2115.50	1708.92	1574.65	1995.31
St.1	2113.60	1648.83	1485.45	1805.63
St.2	2104.20	1552.11	1574.65	1437.56
St.3	2115.50	1708.92	1479.81	1995.31
St.4	2106.00	1646.95	1344.00	1900.00
St.5	185.90	61.97	58.22	64.79
St.6	164.30	.	57.28	.

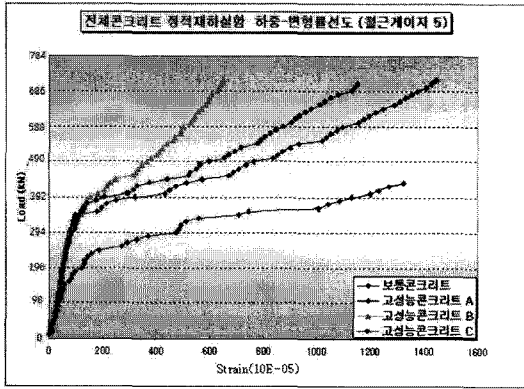


Fig. 6. Specimen Steel Strain.

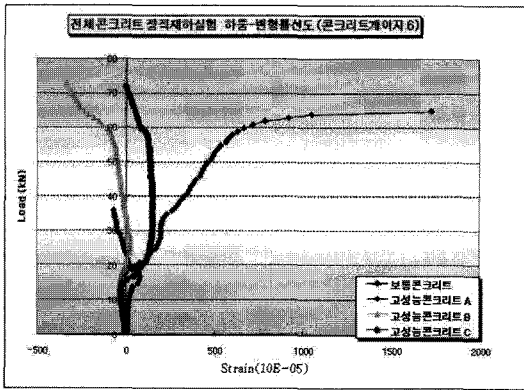


Fig. 7. Specimen Concrete Strain.

이지의 변형률 변화 값을 살펴볼 때 초기 인장변형을 보이다가 하중이 점차 증가함에 따라 압축변형을 함께 보이는 거동을 하여 불규칙적인 변형을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 판 거동에 따라 측면부위에서는 단순인장이 아닌 비틀림이나 복잡한 판 거동을 보이는 것으로 사료되어진다.

3.2. 피로시험 결과 및 고찰

각 피로시험체의 치짐측정 결과는 Table 6과 같고 시험체의 반복회수-최대치짐선도는 Fig. 8과 같다.

고성능 A Type의 콘크리트가 가장 작은 변형을 보였다. 반면 Concrete gauge의 경우 서로 Co.2의 동일한 위치에서 최대값을 보이기는 하였으나, 압

Table 6. Specimen Deflection

		보통 콘크리트	고성능 A Type	고성능 B Type	고성능 C Type
최대 변위 (mm)	좌측	0.7	0.78	0.76	0.71
	중앙	1.38	1.37	1.1	1.35
	우측	0.69	0.74	0.72	0.87

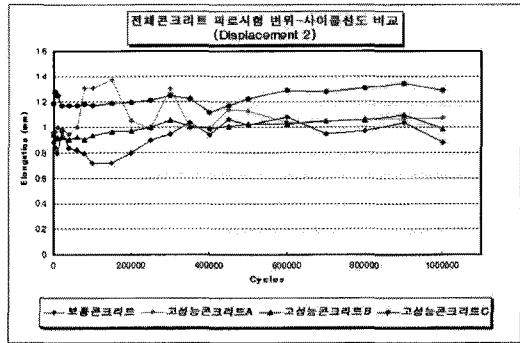


Fig. 8. Cycles - Elongation Curve.

축변형으로서는 보통콘크리트의 변형을 값이 상대적으로 작은 값을 나타내었으며 서로 상이한 측정값을 나타냄을 알 수 있었고 최대·최소응력을 Table 7에, 철근 및 콘크리트 게이지에 따른 반복회수 변형률 선도는 Fig. 9-10에 나타내었다.

보통콘크리트의 경우 최초 5천회에서 측면 초기 균열이 발생한 후 측면 및 밑면 모두 점차 균열길이 증가하다 3만회에 밑면 중앙부위에서 시험체를 횡방향으로 가로지르는 관통균열이 발생하였다.

Table 7. Maximum · Minimum Stress of Specimen

Specimen	철근 최대변형률 ($E \times 10^{-3}$)	콘크리트 최대변형률 ($E \times 10^{-5}$)
	최대응력 (MPa)	최소응력 (MPa)
보통콘크리트	31.205	-12.523
	65.554	-3.883
고성능A Type	30.111	-15.406
	63.233	-4.992
고성능B Type	31.860	-14.549
	66.970	-4.467
고성능C Type	35.728	-18.785
	75.029	-6.011

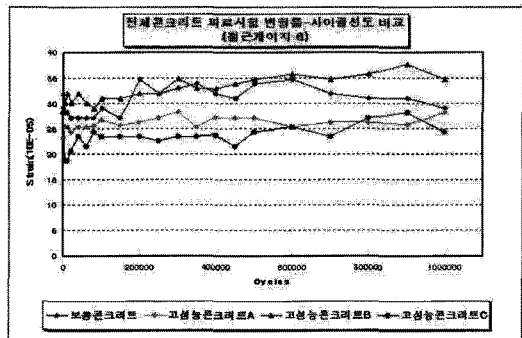


Fig. 9. Cycles - Strain Curve of Steel Gauge.

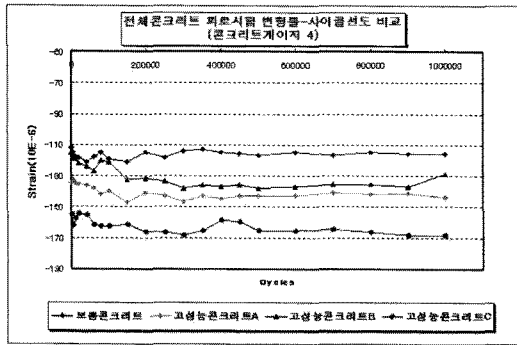


Fig. 10. Cycles - Strain Curve of Concrete Gauge.

고성능 A Type의 경우 5천회에서 최초 초기균열이 발생하였으나 시공시 철근 정착박스에 의한 구멍으로 약간의 단면손실이 발생되어 그 위치에서 균열이 발생된 것으로 추정, 실제 초기 균열은 2만회때 시험체 측면에서 발생되어진 균열로 판단되어 진다.

고성능 B Type의 시험체는 1만회에서 측면중앙 8cm떨어진 위치에서 초기균열이 발생되어졌으며 4만회가 넘어서면서부터 측면보다는 밀면의 균열 진전이 두드러졌다. 최대 균열폭도 0.1mm가 측정되어져 다른 시험체보다 큰 균열폭을 보였다.

고성능 C Type의 시험체는 1만회 반복재하시 정면중앙 좌측부에서 약 2cm가량의 균열 및 밀면에서 20cm가량의 균열길이를 갖는 초기균열이 발생하였으며 6만회가 지나면서부터 밀면부위를 가로지르는 횡방향 관통균열이 관측되었다. 이후 25만회가 지나고 산발적인 방사형 균열들이 다수 생겨나기 시작했으나, 균열폭은 0.05mm 이하로 미세하였다.

이를 고찰하여 볼 때 고성능 A, B, C Type 및 보통콘크리트의 피로시험시 최대처짐 비교 값을 살펴보면 양쪽측면에 위치한 변위계값은 4종류 모두 비슷한 값을 보인 반면, 중앙에 위치한 변위계에서의 처짐은 고성능 B Type의 콘크리트가 가장 작은 값의 처짐을 나타냄을 알 수 있었다. 하지만 그 처짐의 수치가 매우 미소하며 큰 차이를 나타내지는 않는 것으로 보여진다. 결국 피로시험에서의 처짐 정도는 4종류의 콘크리트 시험체가 거의 비슷한 양상을 보이는 것으로 판단되어 진다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브의 품질 및 경제성 향상을 위하여 보통 및 혼화재를 사용한 콘크리트의 정적 및 피로시험을 수행하여 각 시험체의 파괴거동과 피로거동에 따른 결과를 비교·분석 하

여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고성능 콘크리트의 정적시험에 의하면 극한 하중에서 중앙부 처짐은 한 시험체가 가장 작은 값을 보였지만 나머지의 차이는 미소한 것을 알 수 있었다. 반면 보통콘크리트 시험체의 극한하중에서의 중앙 처짐을 비교하여 볼 때 고성능 콘크리트가 약 1.5배 높은 강성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

2) 정하중 시험에서 허용균열폭 0.2mm를 넘는 값은 보통콘크리트의 경우 245.25kN, 고성능 콘크리트의 경우는 343.35kN 이상이었다. 또한 관통균열의 경우 보통콘크리트는 147.15kN, 고성능콘크리트는 245.25kN 이상에서 발생하였다.

3) 시험체의 유한요소 해석치와 실험치를 비교한 결과 철근 변형률의 경우 3.9~9.8%의 오차를 나타내었으며 콘크리트 변형률의 경우 6.8~11.6%의 오차범위를 나타내었다. 비선형 해석의 경우 철근보다는 콘크리트 변형률 값에서 더 큰 오차범위를 나타내는 경향을 보였으나 구조해석의 경우, 콘크리트의 균열예측이 어려운 것을 감안하여 바닥판의 이방향 균열 및 손상정도를 고려한 변수 해석이 앞으로 필요한 것으로 판단되어 진다.

4) 피로하중을 받는 고성능 및 보통콘크리트 시험체는 하중재하 초기시 균열발생 및 균열진전 속도가 컸으나, 반복하중이 증가할수록 완만한 균열 성장을 보였고 최초 관통균열은 보통콘크리트의 경우 3만회, 고성능콘크리트 각 15만회, 30만회, 6만회에서 각기 바닥면 중앙부에서 발생되었다. 피로 시험 종료시 보통콘크리트 시험체는 최대 1.5mm의 균열폭을 보였으며 고성능 시험체의 경우 1.0mm의 동일한 균열폭을 나타내었다.

참고문헌

- 1) 심종성, 오홍섭, “일방향CFS로 성능향상된 교량 상판에관한 시험 및 해석적연구,” 건설공학논문집, pp. 34~44, 2001.
- 2) 오병환, “콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험연구,” 대한토목학회 논문집, pp. 113~119, 1985.12.
- 3) 도로교 설계기준·해설, 대한토목학회, pp. 57~63, 2008.
- 4) 최재진, 전찬기, 김기영, “구조재료실험법,” 원창출판사, pp. 40~49, 1997.
- 5) Fracture Mechanics of Concrete, edited by Sih, G. C., Kluwer Academic Printon Demand, pp. 127~138, 2007.