

PSC 교량용 설계강도 60MPa 이상 고강도 콘크리트의 실용화를 위한 시간의존적 변형 및 내구성에 관한 연구

Time-Dependent Deformation and Durability of High-Strength Concrete over 60MPa for PSC Bridges

양준모* 이주하* 정해문** 안태송*** 윤영수****
Yang, Jun Mo Lee, Joo Ha Cheong, Hai Moon Ahn, Tae Song Yoon, Young Soo

ABSTRACT

In this study, various fundamental experiments including durability and time-dependent deformation are performed to compile a database for a utilization of high-strength concrete for PSC bridges. In the mix design, concrete strength at early age when prestressing forces are introduced to the PSC member and slumpflow suitable for pumping of concrete are considered to make a concrete fit for PSC bridges. The main parameters investigated are the kinds and replacement ratios of mineral admixtures and low-heat cement. Experimental tests on durability include penetration of chloride ions, freezing-thawing, combined deterioration, and simple adiabatic temperature rise test. In addition, time-dependent deformation such as creep, drying and autogenous shrinkage, which is particularly important factor in the design and construction of PSC bridges, is tested and analyzed.

1. 서 론

지금까지 고강도 콘크리트에 대한 연구는 고층 빌딩과 같은 건축구조물에 초점을 맞추고 있으나, 최근 들어서는 PSC 교량 구조물과 같은 토목구조물에서도 고강도 콘크리트의 적용이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 PSC 교량용 설계강도 60MPa 이상의 고강도 콘크리트 실용화를 위해 시간의존적 변형 및 내구성 평가 실험을 수행하였다. 이를 위해 기본적으로 프리스트레스가 도입되는 시점인 초기 재령의 강도와 펌프압송에 용이한 슬럼프플로우를 만족하도록 배합설계를 하였다. 주요 실험 변수로써 혼화재료(플라이애쉬, 고로슬래그미분말) 및 저열시멘트의 치환율을 달리하여 내구성 향상에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 주요실험변수 및 배합

본 내구성 실험에 앞서 배합 및 역학적 특성 실험이 수행되었으며, 이를 통해 내구성 실험에 적용할 배합비를 결정하였다. 설계강도 60MPa의 안정적 획득을 위해 물-결합재비 28%, 단위수량 170kg/cm³을 사용하였다. 잔골재율은 43%를 취하였으며, 슬럼프플로우 50±5cm와 공기량 5.0±1.5%을 만족시키도록 혼화제를 혼입하였다. 본 연구의 주요 변수는 결합재의 종류로써 보통포틀랜드시멘트(OPC), 플라이애쉬 10%(FA10), 20%(FA20) 치환, 고로슬래그 30%(BS30), 50%(BS50) 치환, 플라이애쉬 15%와 고로슬래그 35%를 동시에 치환한 3성분계(FA15BS35), 그리고 저열시멘트(LHC)가 사용되었다. 이 총 7배합에 대해 내구성 및 시간의존적 변형 평가 실험을 수행하였으며, 각 혼화제별 비교 평가를 위해 혼화제 치환율 이외의 구성재료에 대한 배합비는 모두 동일한 값을 갖도록 하였다.

* 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹 책임연구원

*** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹 수석연구원

**** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

3. 실험계획 및 방법

3.1 염화물 확산 특성 평가

염소이온 확산시험은 Tang과 Nilsson이 제안한 전기촉진 시험방법을 참조하여 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, 3% NaCl 수용액을 음극으로 하여 8시간동안 수행하였다. 전위차 촉진시험법에 의한 염소이온 확산계수(D_{cpd})는 염소이온 침투깊이로부터 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\text{Tang's Method; } D_{cpd} = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad \text{여기서, } \alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

D_{cpd} : 염화를 확산계수(m^2/sec), z : 이온의 원자가(염소이온의 경우 $z=1$), F : 페러데이 상수(96,481.04 J/Vmol), U : 양극과 음극 사이의 전압차(V), R : 기체상수(8,314 J/Kmol), T : 용액의 온도(K), L : 시편의 두께(m), x_d : 염소이온의 침투 깊이(m), t : 실험 지속시간(sec), erf : error function, C_d : 절산이온에 의한 변색된 부분의 염소이온 농도 (mol/l), C_0 : 음극 셀의 염소이온 농도 (mol/l)

3.2 동결융해 및 복합열화 저항성 평가

동결융해 실험은 KS F 2456 ‘급속동결융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법’에 따라 수행되었으며, 상수에 의한 동결융해와 농도 10%의 염화칼슘 용액을 동결수로 사용한 제빙법에 의한 복합열화를 실험하였다. 콘크리트의 내부 조직 저항성에 대한 평가는 상대동탄성계수 측정을 통해 수행하였으며, 표면열화평가는 표 1의 ASTM C 672에서 제시하는 스케일링 육안평가를 이용하였다.

표 1 ASTM C 672 에서 정한 육안등급

rating	condition of surface
0	No scaling
1	Very Slight scaling
2	Slight to moderate scaling
3	Moderate scaling (some coarse aggregate visible)
4	Moderate to severe scaling
5	Severe scaling (coarse aggregate visible over entire surface)

3.3 간이 단열온도상승 실험

수화열 측정을 위해 단열처리한 용량 64l(400×400×400mm)의 거푸집을 제작하여 콘크리트를 타설한 후, Thermocouple을 시편 중앙부에 정착하여 Maturity meter로 내부 온도변화를 측정하였다.

3.4 크리프 및 건조수축

크리프 측정은 정확도 향상을 위해 매립 게이지를 사용하여 측정하였으며, PSC의 특성상 초기 프리스트레스 하중의 적용시점을 고려해 재령 3일에 하중을 재하하였다. 또한 OPC, FA10, FA20, BS50은 시편을 추가 제작하여 재령 28일에 하중을 가한 후, 재하시점에 따른 크리프의 영향을 파악하였다.

3.5 자기수축

자기수축시험은 JCI에서 제안하고 있는 방법에 따라 100×100×400mm의 시편을 제작하였다. 변형량은 시편 중심부의 매립게이지를 통해 측정하였으며, 타설 후 수분 이동을 막기 위해 즉시 비닐로 밀봉한 후 젖은 수건으로 시편을 덮었다. 항온항습실에서 데이터로거를 통해 측정을 시작하였으며, 24시간 후 탈형하여 알루미늄 테이프로 완전히 밀봉하고 지속적으로 자기수축량을 측정하였다. 또한 자기수축 시험체와 동일한 크기의 시편을 사용하여 ASTM C 157 방법에 따라 건조수축을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 염화물 확산 특성 평가

그림 1은 혼화제 종류 및 치환율에 따른 염화물 확산계수를 나타낸 것이다. 플라이애쉬 치환배합의 경우, 염화물 확산계수가 OPC보다 크게 나타났으며, 치환율의 증가에 따라 확산계수도 증가되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 플라이애쉬로 인한 포졸란 반응의 지연으로 장기간에 걸쳐 조직의 치밀성이 증대되는 특성 때문인 것으로 보인다. BS 치환배합의 경우, 3성분계 배합을 포함한 모든 치환율에서 OPC 배합에 비하여 낮은 염화물 확산계수를 보이고 있다. 이는 고로슬래그 미분말의 염화물

이온 고정화 능력과 더불어 높은 혼화재 치환율 등의 영향에 기인한 것으로 판단된다. 반면 LHC는 다른 배합에 비해 상당히 큰 확산계수 값을 보였다. 주목할 점은, 실험 재령 당시 LHC는 72.1MPa로 높은 압축강도를 보였음에도 염화물 투과 저항 성능이 떨어졌다. 그림 2에서 보듯이, LHC를 제외하고는 염화물 확산계수의 값이 강도에 반비례하는 경향을 보였다. 강도의 증가에 따른 콘크리트 조직 내 미세공극의 불연속화에 염화물 확산계수가 크게 영향을 받는 것으로 판단된다.

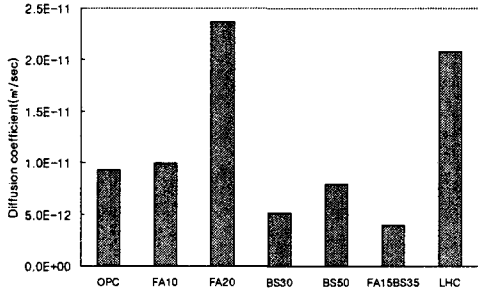


그림 1 배합별 염화물 확산계수

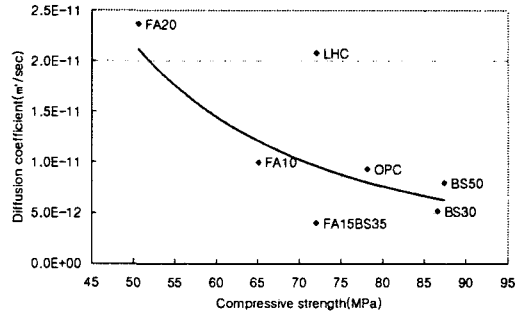


그림 2 압축강도와 염화물 확산계수 상관관계

4.2 동결융해 및 복합열화 저항성 평가

취약한 동결융해 저항성을 보인 FA20 배합을 제외하면, 혼화재료가 동결융해저항성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 보통 혼화재료는 콘크리트의 장기강도는 증진시키나, 공기량을 감소시키고 콘크리트와 물 사이의 반응을 지연시켜 조기강도를 얻는데 불리하게 작용하여 전반적으로는 동결융해 저항성에 미치는 영향은 거의 없거나 오히려 불리하게 작용하는 경우가 많다고 알려져 있다. 이러한 성질은 공기연행이 충분한 AE콘크리트에서는 더욱 그러하다. 시험에 사용한 배합은 초기부터 공기량을 고려해 제어해 주었기 때문에 혼화재료의 사용이 동결융해 저항성에 미치는 영향이 거의 없었던 것으로 판단된다.

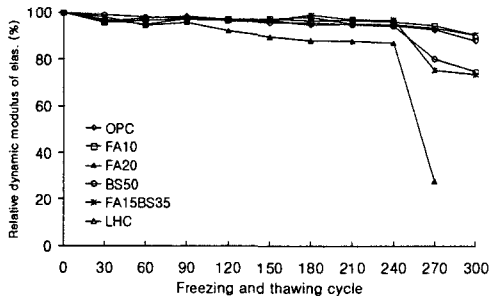


그림 3 복합열화의 상대동탄성계수

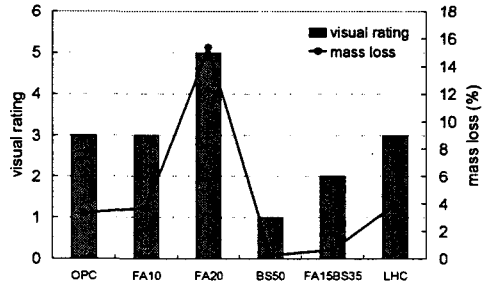


그림 4 복합열화의 육안등급 및 질량손실율

4.3 간이 단열온도상승 실험

그림 5는 혼화재 종류 및 치환율에 따른 간이 단열 온도상승 시험체의 온도이력을 나타낸 것이다. OPC와 비교할 때, 고로슬래그와 저열시멘트를 사용한 배합에서 수화열 저감 및 지연효과가 나타났다. 고로슬래그 치환율이 증가할수록 최고 온도는 낮아지고 있으며, 최고 온도 도달시간 또한 늦어지는 것으로 나타났다. 특히 저열시멘트 사용시 10°C 이상의 수화열이 저감되는 효과를 보여, 타 배합과 확연히 다른 양상을 나타내었다.

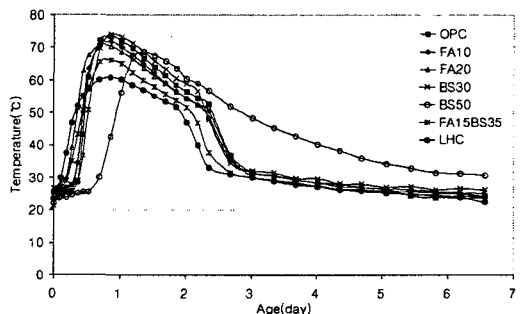


그림 5 배합별 수화열 이력 곡선

4.4 크리프 및 건조수축

그림 6은 3일 재령에서 하중을 재하한 콘크리트의 비크리프를 나타내고 있다. 고로슬래그는 비크리프를 줄여주는 것으로 나타났으나, 플라이애쉬의 경우는 반대의 현상이 발생하였다. 이는 플라이애쉬를 치환한 배합의 압축강도가 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 저열시멘트는 비크리프가 OPC의 경우보다 더 크게 나타났으며, 비크리프의 경향은 10일 정도에서 수렴한 OPC와 달리 낮은 증가율이긴 하나 계속 증가 추세를 보이고 있다.

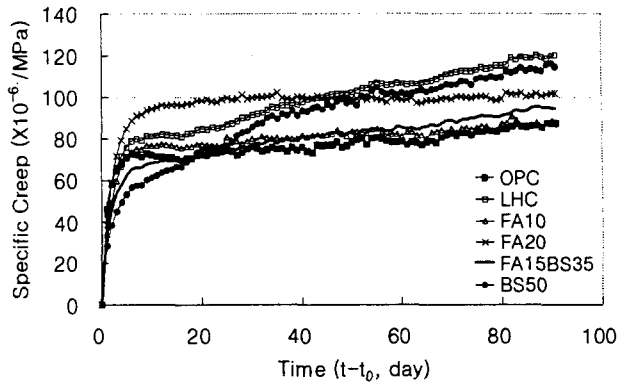


그림 6 3일재령 재하 콘크리트의 비크리프

4.5 자기수축

그림 7에서 볼 수 있듯이, 플라이애쉬 및 저열시멘트를 사용한 배합이 OPC보다 더 작은 자기수축량을 보였으며, 특히 저열시멘트 배합은 자기수축량의 감소에 매우 우수한 성능을 보였다. 반면에 3성분계 배합을 포함하여 고로슬래그를 치환한 배합들은 OPC에 비해 더 큰 자기수축량을 나타내었다. 뿐만 아니라, OPC 및 고로슬래그 배합은 7일 재령에서 이미 28일 재령시 발생하는 자기수축량의 약 60% 정도가 발생하는 등 초기에 자기수축이 급격하게 발생하는 반면, 플라이애쉬와 저열시멘트 배합은 재령의 증가에 따라 자기수축량이 완만히 발생하는 것으로 관찰됐다. 또한 그림 8과 같이, 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 자기수축 비율 역시 증가함을 알 수 있다. 특히, OPC와 BS30, BS50, 그리고 FA15BS35는 자기수축량이 총 수축량의 50% 이상을 차지하고 있어 초기 자기수축량이 고강도 콘크리트의 수축 특성에 매우 중요한 부분임을 알 수 있다.

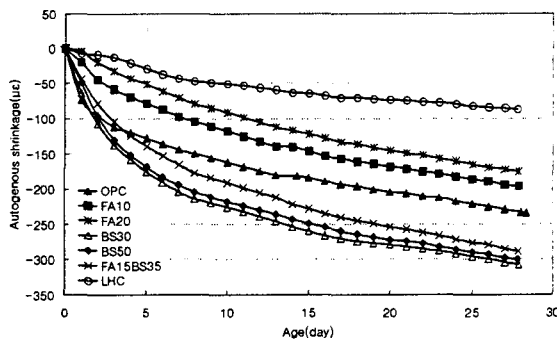


그림 7 배합별 자기수축 변형률

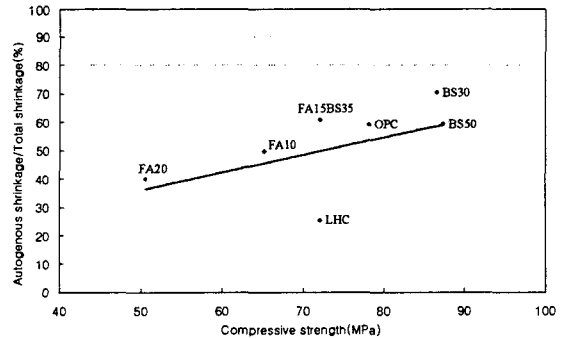


그림 8 압축강도와 자기수축율의 상관관계

5. 결론

본 연구에서는 PSC 부재에 적합한 60MPa 이상의 고강도 콘크리트의 재료를 개발하여, PSC 교량의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요하게 고려되는 재료적 거동인 시간 의존적 변형 및 다양한 열화 조건에 대한 내구성능의 평가를 수행함으로써 그와 관련한 기초 데이터 베이스를 구축하였다.

참고 문헌

1. Bazant, Z. P., and Panula, L., "Creep and Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structures," Journal of The Prestressed Concrete Institute, Vol. 12, No. 2, May-June 1980, pp. 86-124.
2. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite, 'State-of-the-Art Report on Control of Cracking in Early Age Concrete' JCI (2004) vol.2, No 2, pp141-154.