

PSC 교량용 설계강도 60 MPa 이상 고강도 콘크리트의 실용화를 위한 배합 및 역학적 특성에 관한 연구

Mechanical Properties and Mix Proportion of High-Strength Concrete over 60MPa for PSC Bridges

이주하* 정현석** 정해문*** 안태송**** 윤영수*****
Lee, Joo Ha Jung, Hyun Suck Cheong, Hai Moon Ahn, Tae Song Yoon, Young Soo

ABSTRACT

Many researches have been carried out on development of high-strength concrete, but most researches have been focused on building structures such as a high-rise building. However today, the demand of high-strength concrete for civil structures like a PSC bridge is increasing steadily. In addition, the current design code based on experimental results of normal strength concrete needs to be modified for high-strength concrete structures. Therefore, it is necessary to perform a research on mechanical properties and mix proportion of high-strength concrete suitable for PSC bridges. The primary purpose of this study was to develop the high-strength concrete mixtures which can be applied to PSC bridges and to evaluate mechanical properties of high-strength concrete.

1. 서론

현재 국내외적으로 고강도 콘크리트 개발에 대한 많은 연구가 수행되고 있으며, 그 대부분은 고층 빌딩과 같은 건축구조물에 초점을 맞추고 있다. 하지만 최근 들어 교량 등과 같은 토목구조물에도 장기적 측면의 경제성과 안전성을 고려하여 고강도 콘크리트 적용에 대한 요구가 증가하고 있는 추세이다. 또한 현행 설계기준은 일반강도 콘크리트의 실험 결과를 바탕으로 하고 있어, 고강도 콘크리트가 적용된 구조물의 설계를 위해서는 고강도 콘크리트에 대한 기본적인 특성 파악을 통한 설계 반영이 요구된다. 이에 본 연구에서는 PSC 교량과 같은 특수한 요구 성능에 부합하는 60MPa 이상의 고강도 콘크리트의 재료를 개발하며, 개발된 고강도 콘크리트에 대하여 역학적 특성 평가를 수행함으로써 설계시 사용하는 고강도 콘크리트 물성에 관한 기초 데이터베이스를 구축하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트의 배합 선정

각 배합변수에 따라 80회의 시험 배합을 실시하였으며, 그 결과를 바탕으로 본 실험에서 적용될 고강도 콘크리트의 최적배합비를 도출하였다. 설계기준강도 60MPa의 안정적 획득을 위해 물-결합재비를 28%로 하였으며, 단위수량은 170kg/m³을 사용하였다. 잔골재율은 43%를 취하였으며, 목표 물성치로 슬럼프플로우 50±5cm와 공기량 5.0±1.5%을 만족시키도록 혼화제를 혼입하였다. 본 연구의 주요 변수는 결합재의 종류로서 OPC, 플라이애쉬 10%(FA10), 20%(FA20) 치환, 고로슬래그 30%(BS30),

* 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

*** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹 책임연구원

**** 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 재료환경연구그룹 수석연구원

***** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

표 1 변수별 배합표

| Mixture | W/B(%) | S/a(%) | Unit Weight(kg/m ³) | | | | | |
|----------|--------|--------|---------------------------------|--------|-----|-----|-----------|-------------|
| | | | W | Cement | FA | BS | Fine Agg. | Coarse Agg. |
| OPC | 28 | 43 | 170 | 607 | - | - | 676 | 910 |
| FA10 | 28 | 43 | 170 | 546 | 61 | - | 667 | 898 |
| FA20 | 28 | 43 | 170 | 486 | 121 | - | 658 | 885 |
| BS30 | 28 | 43 | 170 | 425 | - | 182 | 668 | 900 |
| BS50 | 28 | 43 | 170 | 304 | - | 304 | 663 | 892 |
| FA15BS35 | 28 | 43 | 170 | 304 | 91 | 213 | 653 | 879 |
| LHC | 28 | 43 | 170 | 607 | - | - | 676 | 910 |

50%(BS50) 치환, 플라이애쉬 15%와 고로슬래그 35%를 동시에 치환한 3성분계(FA15BS35), 그리고 저열시멘트(LHC)가 사용되었다. 이 총 7배합에 대해 각각 역학적 특성 평가 실험을 수행하였으며, 이때 각 혼화재별 비교 평가를 위해 혼화재 치환을 이외의 구성재료에 대한 배합비는 모두 동일한 값을 갖도록 하였다. 표 1에 각 변수별 배합표를 정리하였다.

배합에 따른 물성치 실험의 결과를 살펴보면, 고로슬래그를 포함한 배합인 BS30, BS50, FA15BS35가 OPC와 FA10, FA20에 비해 적은 양의 고유동화제로도 소요의 슬럼프플로우를 얻어 낼 수 있었다. 또한 저열시멘트 배합은 그 보다도 훨씬 더 적은 양의 고유동화제로 쉽게 유동성이 증진되었다. 하지만 저열시멘트는 배합시 물성의 제어가 가장 어려웠다. 즉 소요의 슬럼프를 얻기 이전에 골재 분리 현상이 쉽게 일어나는 것을 볼 수 있었으며, 과도한 기포 발생 등으로 AE제를 통한 공기연행에 세심한 주의를 요구했다.

3. 고강도 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수

압축강도 및 탄성계수 실험은 재령 3일, 7일, 28일, 56일의 시편에 대해 각각 수행되었다. 이를 위해 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 공시체를 제작하였으며, 항온항습실에서 24시간 양생한 후 몰드를 제거하여 20°C의 수조에서 실험 전까지 수중 양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 각각 KS F 2405와 KS F 2438에 따라 실험을 실시하였다.

도로교설계기준(2003)에서는 프리스트레싱 시의 콘크리트의 압축강도는 프리스트레싱 직후의 콘크리트에 생기는 최대 압축응력의 1.7배 이상, 또는 28MPa 이상이어야 하며, 프리텐션 방식의 경우 콘크리트의 압축강도는 30MPa 이상이어야 한다고 규정하고 있다. 그림 1은 각 배합별 재령에 따른 압축강도의 발현 양상을 나타내고 있다. 3일 재령 콘크리트의 경우 프리텐션 도입 시기로서 적합한 배합은 OPC와 FA10, BS30, LHC로 나타났다. 그 외 FA20, BS50, 그리고 FA15BS35의 경우는 혼화재 치

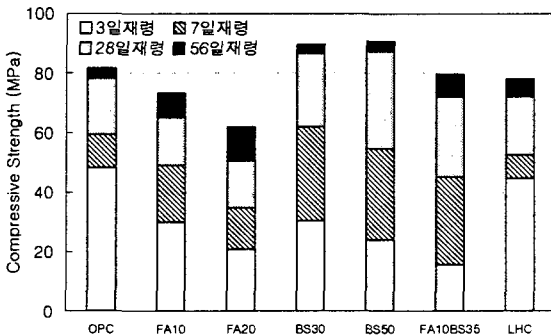


그림 1 재령별 압축강도

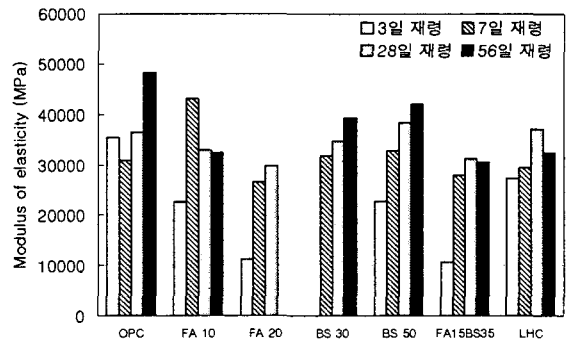


그림 2 재령별 탄성계수

환율이 상대적으로 높아 강도 발현 시기가 지연됨에 따른 결과로 보여진다. 7일 재령 이후의 경우는 프리텐션 도입 강도를 충분히 발현을 하였으며, 28일 재령에서는 설계기준강도 60MPa 이상의 강도를 거의 발현하였다. FA 20의 경우 강도발현이 더욱 느려 56일에 가서야 설계강도를 만족하는 수준의 강도를 얻을 수 있었다. 고로슬래그의 치환은 장기강도의 증진에 우수한 효과를 보인 반면에, 플라이에쉬의 경우는 강도 발현에 다소 불리한 결과를 나타냈다. 그림 2에 의하면 각 재령별 탄성계수의 변화는 강도의 증가에 따라 탄성계수가 증가하는 경향이 나타났다. 하지만 혼화재의 종류 및 치환율에 따른 탄성계수의 변화에는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

4. 고강도 콘크리트의 쪼갬인장강도 및 휨강도

각 배합별로 쪼갬인장강도 및 휨강도 실험을 위해 각각 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 공시체 및 $150 \times 150 \times 550 \text{mm}$ 의 빔 공시체를 제작하였다. 실험은 재령 7일, 28일, 56일에 대해 수행되었다. 콘크리트의 쪼갬인장강도와 휨강도 측정은 각각 KS F 2423과 KS F 2408에 따라 실시하였다.

Dewar에 의하면 보통강도 콘크리트의 경우 쪼갬인장강도는 압축강도의 10% 정도이고, 고강도 콘크리트에서는 그 값은 5%까지 감소한다고 하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, Dewar의 연구와 마찬가지로 본 실험에서도 쪼갬인장강도가 대개 압축강도의 약 5% 범위의 값을 나타냈다. 또한 Carrasquillo 등의 연구에서 언급된 바와 같이, 각 혼화재 종류 및 치환율에 따른 영향은 나타나지 않았다.

그림 4는 휨강도 실험결과를 나타내고 있다. 재령에 따른 휨강도의 증진은 거의 나타나지 않았으며, 대개 콘크리트 구조설계기준에서 제시하고 있는 휨강도 산정식에서와 같이 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났다.

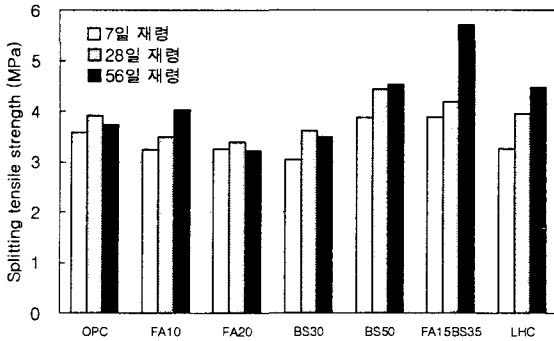


그림 3 재령별 쪼갬인장강도

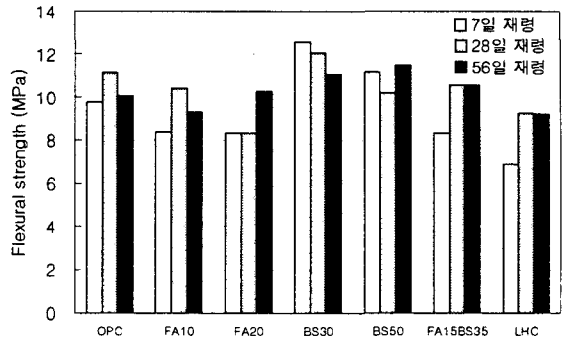


그림 4 재령별 휨강도

5. 고강도 콘크리트의 철근부착강도

각 변수별 평균부착응력을 분석하기 위해 $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$ 의 정방형 시편을 제작하였으며, SD-30의 D19 이형 철근을 사용하였다. 실험 시편은 모두 할렬 파괴를 유도하였다. 실험 방법은 ASTM 규준에 명시된 Pullout Test로 하였으며 입방형의 콘크리트 블록 속에 묻힌 철근을 잡아당겨 철근이 뽑히거나 과도한 슬립이 일어나게 되는 하중을 측정하였다. 그림 5에 부착응력-변위 곡선을 나타내었다. 실험체에 균열이 발생하면 하중의 증가 없이도 철근의 변위가 크

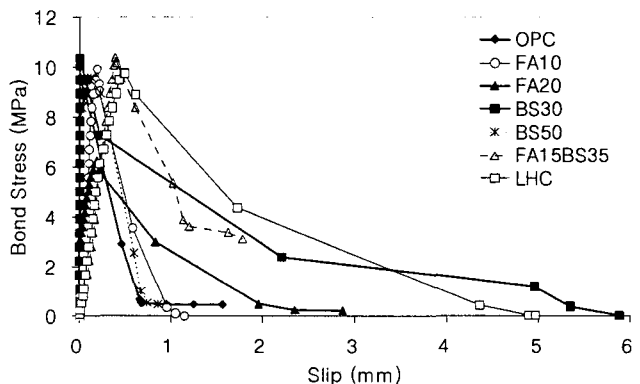


그림 5 배합별 부착응력-변위 곡선

게 증가하여 철근과 콘크리트간의 부착력은 거의 존재하지 않게 되는 것으로 관찰됐다. 또한 하중 재하에 따른 실험체의 파괴형태는 배합 변수에 관계없이 대체로 유사하게 나타났으며, 콘크리트의 압축강도가 높아 급작스런 파괴양상을 보였다. 부착응력-변위관계 곡선에서 볼 수 있듯이, 고강도 콘크리트는 일반강도 콘크리트에 비해 최대 변위와 극한부착응력이 발생하는 시점에서의 변위량이 작다. 또한 극한부착응력이 발생하기까지의 상승부분과 발생한 후의 하강부분에서의 기울기가 급격함을 알 수 있다. 이는 콘크리트가 고강도화 됨에 따라 부착응력이 증가하고 변위량은 작으나 취성적인 파괴가 발생할 수 있음을 나타내고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 PSC 부재에 적합한 60MPa 이상 고강도 콘크리트의 최적 배합을 개발하였으며, 개발된 고강도 콘크리트에 대하여 역학적 특성 평가를 수행함으로써 설계시 사용하는 고강도 콘크리트 물성에 관한 기초 데이터베이스를 확보하였다. 고강도 콘크리트의 역학적 성능 평가 실험으로 압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도, 휨인장강도, 부착강도 실험을 수행하였으며, 이를 통해 다음의 결과를 도출하였다.

- 1) 설계기준강도 60MPa의 안정적 획득을 위해 물-결합재비를 28%로 하였으며, 단위수량은 170kg/m³, 잔골재율은 43%를 취하였다. 하지만 고강도 콘크리트의 배합은 많은 요소에 영향을 받으므로 매우 다양하게 도출될 수 있다. 특히, 소요강도, 재령, 재료 특성 및 적용 대상구조물의 유형과 같은 일반적인 고려사항들 뿐만 아니라 경제적, 구조적 요건, 생산 실용성, 양생 환경 및 운송 시간 등의 배합비 선정시 영향을 미치는 여러 요인들을 다각도로 고려해야 한다.
- 2) PSC용 고강도 콘크리트의 경우 초기 재령에서의 강도 획득이 중요하다. 실험결과 3일 재령에서는 프리스트레스 도입시 요구되는 강도의 기준에 만족하는 배합은 OPC와 FA10, BS30 그리고 LHC로 나타났다. 즉, FA20, BS50, FA15BS35 등과 같이 혼화재의 치환율이 높은 배합의 경우 강도 발현 시기가 늦춰져 초기 강도 획득 측면에 불리한 것으로 나타났다. 7일 재령에서는 다량의 혼화재를 치환한 FA20, BS50, FA15BS35 배합도 프리스트레스 도입이 가능한 강도 범위에 들어왔으며, 28일 재령에서는 FA20을 제외한 모든 배합이 설계강도 60MPa 이상의 강도를 발현하였다.
- 3) 각 재령별 탄성계수의 변화는 강도의 증가에 따라 탄성계수가 증가하는 경향이 나타났지만, 혼화재별 탄성계수의 변화는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다.
- 4) 쪼갬인장강도는 모든 배합이 압축강도의 약 5% 범위 수준을 보였으며, 재령별로는 압축강도의 증가에도 불구하고 큰 폭의 변화가 발생하지는 않았으며, 휨강도의 경우에도 재령에 따른 강도의 증진은 매우 미비한 것으로 나타났다.
- 5) 철근부착강도 실험의 경우, 압축강도가 가장 낮은 FA20을 제외한 모든 시험체가 거의 비슷한 평균 극한부착응력을 나타내었다. 또한, 콘크리트가 고강도화 됨에 따라 부착강도가 증가하고 슬립량은 작게 발생하나, 취성적인 파괴가 발생할 수 있음을 나타내었다.

참고 문헌

1. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Simulation of Uniform Bond Stress", ACI Materials Journal, V.89, No.2, March-April, 1992
2. Yankelevsky, D. Z., "Bond Action Between Concrete and a Deformed Bar - A New Model", ACI Journal, Vol.82, No.1, 1985, pp.40-45.
3. 박성태, 윤영수, "고장력 철근을 활용한 R.C. 부재의 부착특성에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권1-A호, 2002. 1, pp.85-94