

Global Report

폐화강석 분말을 함유하는 친환경 콘크리트의 내구성

1. 개요
2. 소개
3. 관련문헌 검토
4. 실험계획
5. 시험결과 및 검토
6. 결론

1. 개요

이 보고서는 콘크리트용 시멘트와 모래의 부분 대체재로서 다양한 비율의 폐화강석 분말을 함유하는 친환경 콘크리트의 내구성능 평가를 목표로 한다. 슬럼프 테스트, 간접 내화성능 시험, 흡수율 시험 및 투수성 시험 등의 물리적 시험들이 내구성에 대한 지표로서 콘크리트 시험체에 수행되었다. SEM(Scanning Electron Microscope - 주사형 전자현미경)도 미세구조수준에서 콘크리트 시편 내부의 공극들을 조사할 뿐만 아니라 ITZ(Inter-facial Transition Zone - 계면전이구역)를 조사함으로써 콘크리트의 미세구조를 조사하는데 사용되었다.

연구결과 친환경 콘크리트의 시공연도는 물시멘트비 0.45의 모든 배합의 경우 폐화강석분말을 사용하지 않은 관리기준배합의 시공연도 보다 감소하는 것으로 나타났다. 시멘트의 부분 대체재로 폐화강석분말을 5% 첨가한 경우 SEM 이미지를 관찰한 결과 모든 배합 가운데에서 공극의 수가 가장 적고 최소화되어 보다 치밀한 콘크리트 배합인 것으로 나타났으며 흡수율도 최소화되어 방수성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

본 연구결과 콘크리트 배합에 폐 미세화강석 분말을 첨가시키면 일부 내구특성에 도움이 된다는 결론을 내릴 수 있다. 또한 시멘트 또는 모래의 부분 대체재로 폐화강석 분말을 첨가시키면 고온 상태의 콘크리트 강도 증진 측면에서 긍정적인 결과를 보이는 것으로 나타났다.

2. 소개

현재 건설업계는 건축물 내구성의 중요성을 고조시키는데 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 건설부문에 다음과 같은 두 가지 필수적인 측면이 고려되어야 한다. 즉 건설되는 건축물에 있어서 기술공정(engineering work)에 의한 내구성과 재료에 의한 내구성이 그것이다. 기술공정의 사례로는 내구성 증진을 위해 결함이 있는 재료의 부분적인 교체를 용이하게 하는 모듈식 시공법이 있다. 한편, 건설 자재의 내구성을 높이려면(해당 제품이 최초제품의 반복적인 생산품일 경우)해당 자재로 인해 야기되는 환경에 대한 부정적인 영향이 얼마나 감소되는지에 대한 측정치가 산정되어야 한다.

이 보고서에서는 폐 화강석재료로 만드는 몰탈과 콘크리트의 대체품을 찾는 것을 목표로 건설재의 내구성을 조사코자 한다. 그러한 연구의 실행을 위한 기본적인 전제조건은 생산되는 친환경 콘크리트로 건설되는 건축물이나 부재의 품질에는 어떠한 중대한 성능저하라도 확실하게 없어야만 한다.

3. 관련문헌 검토

내구성은 어떤 자재가 “전 생애주기에 대해 원래의 필요조건들을 유지할 수 있는 기능적 지표”로 간주된다. 내구성이 큰 자재는 내구성을 유지하기 위해 시간이나 자원을 크게 필요로 하지 않는다. 친환경 건축재를 사용하면 내재에너지가 적고 내구성이 크며 유지관리가 용이하여 지속가능한 건설개발로 이어질 수 있다. Jepsen et al.은 다양한 종류의 친환경 콘크리트에 대한 내구성을 연구하였다. 그의 연구결과 콘크리트업계에서 산업폐기물을 사용하면 지속가능한 설계와 보다 친환경적인 건설로 이어질 수 있다고 결론지었다. 환경을 보호하고 비용을 절약하려면 비전통적인 골재로 콘크리트를 개발하는 것이 필수이다.

Senthamarai와 Manoharan, Halicka A.,와 Wioletta J. et al.은 시멘트 기반의 몰탈에 기존 채석 굵은 골재의 대체재로 도자기 산업의 폐기물 활용 가능성에 대해 연구하였다. 그 연구는 균질도(consistency), 성형성(plasticity), 작업성 유지정도(workability retention) 및 공기량 등에 중점을 두고 수행되었다. 연구결과 중

량비로 20%까지 부분 대체하면 건조수축이 감소될 뿐만 아니라 압축강도와 휨강도가 개선되는 것으로 나타났다. 또한 산업 폐기물이나 기타 폐기물이 콘크리트 배합에 사용되는 경우 콘크리트의 특성이 개선될 뿐만 아니라 비용도 감소되었다.

Moriconi는 구조물 콘크리트 제조 시 천연 세골재 및 천연 조골재의 대체재로 최대 30%까지, 벽돌조각(masonry rubble)을 활용한 크기 약 15mm의 재활용 골재를 사용하였다. 연구결과 세골재에 대한 대체재로 플라이애시를 첨가하면 콘크리트의 압축강도가 개선된다는 사실을 발견하였다. 재활용 골재를 사용하는 콘크리트의 내구성측면에서 플라이애시를 첨가하면 공극구조가 개선되고 대형간극용적(macro-pore volume)은 감소되는 것으로 나타났다. 콘크리트의 동결융해 작용의 반복에 대한 내성에는 차이점이 발견되지 않았다. 또한 플라이애시를 첨가하면 플라이애시의 필러 효과와 포졸란 작용으로 시멘트 매트릭스의 공극이 작아지기 때문에 콘크리트의 탄산화 및 염화물 이온 침투깊이가 감소하였다.

4. 실험계획

4.1 사용 재료

이번 연구에는 결합재(binding material)로서 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)가 사용되었다. 시멘트의 비중은 이집트 표준시방서와 관련 규정에 따라 시험이 실시되었다. 시멘트의 비중은 3.15이었으며 170번 체를 통과하는 미세립자의 비율은 9%이었다. 초기 및 최종 응결시간은 각각 2시간과 3시간 12분 이었다. 세골재는 지역에서 나는 최대크기 4.75mm 규격의 것으로 피라미드 채석장 Giza에서 나는 천연모래였다. 조골재로는 최대 크기 19mm의 것이 사용되었다. 시멘트 기반의 몰탈에 사용되는 기존의 시멘트와 세골재를 대체하기 위한 슬러지 분말로 사용된 것은 이집트의 Shaqu - Elteban에서 나온 부산물인 일련의 폐화강석 분말이었다. 화강암 폐 슬러리를 건조시켜 일정한 물시멘트 배합이 되도록 분말과 물로 반죽(mud)이 만들어졌다. 폐 화강석 분말은 6시간 동안 섭씨 200도의 오븐에서 건조되었다. 폐 화강석 분말은 건조 후의 무게를 측정하였고 그 무게의 차이는 수분함량을 최소화하기 위하여 10% 이하가 되도록 하였다. 300번체를 통과하는 입자의 폐화강석 분말이 시멘트의 대체재로 사용되었다. 한편 4.76mm 체를 통과하는 폐화강석 입자는 모래의 대체재로 사용되었다. 콘크리트 배합에 사용된 물은 섭씨 20-30도 사이의 깨끗한 수돗물이 사용되었다.

4.2 콘크리트 배합설계

이집트 표준시방서에 따른 350급 콘크리트의 배합설계에서 중량비로 폐화강석 분말(시멘트 대체 5% 및 10%)과 폐화강석 입자(모래 대체 10% 및 17.5%)가 시멘트 또는 세골재를 부분 대체하도록 채택되었다. 또한 폐화강석 분말이나 입자를 포함시키지 않은 관리기준 배합도 준비되었다.

4.3 시편

150 x 150 x 150mm 규격의 콘크리트 큐브 시편이 사용되었다. 이번 실험에 설계된 시편들은 RILEM 7-II128 요건을 초과 만족하였다. 실험용 역류 믹서기를 이용하여 5분 동안 콘크리트 배합을 혼합하였다. 혼합물이 타설되었고 진동기로 다짐작업 후 24시간 유지시킨 다음 28일 동안 양생조에서 양생이 실시되었다.

4.4 실험실 작업 수행

슬럼프 시험은 ASTM C 143의 기준에 따라 실시되었다. 콘크리트의 내구성에 관해 폐화강석을 사용하는 효과를 연구하기 위해 다음과 같은 세 가지 종류의 실험실 시험이 수행되었다. 즉, 1) 간접적인 화재로

인한 영향 2) 투수성 3) 침수 흡수성시험이다. 또한 폐화강석 분말을 혼입하는 것이 콘크리트의 미세구조에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고 콘크리트의 표면형태를 연구하기 위해 SEM 시험이 수행되었다.

4.4.1 간접 화재 시험(Indirect Fire Test)

다양한 대체비율의 폐화강석재를 혼입하였을 경우 고온에서 콘크리트 압축강도에 미치는 관계를 조사하기 위해 섭씨 200도와 섭씨 400도 이 두 가지 종류의 온도가 선택되었다. 이 두 가지 온도로 각각의 시편들을 두 시간 동안 오븐 내에 위치시켰다. 이 후 시편들은 24시간 동안 대기 중에서 냉각되었다. 콘크리트 시험체의 압축강도는 ASTM C39의 기준에 따라 1000KN의 유니버설 시험기계를 사용하여 측정되었다.

4.4.2 투수성 시험

투수성 시험은 일정 압력수두(constant pressure head)하에서 수류(water flow)에 대한 정상상태 투수계수를 측정한다. 투수계수 K는 다음과 같은 Darcy의 식을 사용하여 계산된다.

$$K = \frac{Q L}{\Delta P A}$$

Q : 수류속도 L : 시편의 두께(150mm)

ΔP : 압력수두(30 bar)

A : 시편의 표면적(150 X 150mm)

4.4.3 흡수성 시험

흡수성 시험은 ASTM C642의 기준에 따라 수행되었다. 시편의 건조중량(dry mass - (A))을 확인하기 위하여 시편들은 24시간 동안 섭씨 100도의 오븐에 보관되었다. 오븐에서 꺼낸 후 시편들은 외부의 상온에서 냉각된 후 정밀 저울을 사용하여 중량을 확인하였다. 시편의 포화중량(saturated mass - (B))을 확인하기 위하여 시편들은 48시간 동안 수조에 보관되었다. 시편의 표면을 건조한 후에 포화중량이 확인되었다. 흡수율은 다음과 같은 식으로 산정되었다.

$$\text{흡수율(\%)} = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100$$

5. 시험결과 및 검토

5.1 슬럼프 시험

바로 양생된 콘크리트의 시공연도는 슬럼프 시험 장치를 가지고 측정되었다. 폐화강석분말을 사용하여 제조한 친환경 콘크리트의 슬럼프 값은 30~60mm 정도로 중간정도의 시공연도를 나타내는 것으로 다양한 용도에 사용될 수 있다. 시험결과 폐화강석분말로 대체하면 친환경 콘크리트의 시공연도는 감소하는 것으로 드러났다. 또한 폐화강석분말로 모래를 대체하는 경우 폐화강석재의 대체비율을 증가시키면 콘크리트의 시공연도는 관리기준 배합에 비하여 훨씬 더 감소한다. 폐화강석 슬러지의 분말도가 높을 경우 친환경 콘크리트의 표면 수화량을 증대시켜, 흡수율을 더욱 크게 한다. 이러한 결과는 Filipe G., Gamberio F. 등 과 Singh S. 등이 수행한 연구결과와도 일치하는 것으로, 폐대리석 분말을 혼입할 경우 시공연도는 감소하지만, 그럼에도 불구하고 물시멘트비를 미소하게 변화시키면, 요구되는 목표를 달성하기 위한 작업성을 확보할 수 있는 것으로 판명되었다. 그러나 이러한 물시멘트비의 경미한 개선은 함수

량이 클 경우 콘크리트 강도에 악영향을 미친다는 것을 고려해야 한다.

5.2 간접 화재 시험(Indirect Fire Test)

폐화강석 분말을 함유하는 친환경 콘크리트 시편에 대해 간접 화재에 따른 기계적 특성 시험이 섭씨 200도 및 400도의 고온 하에서 2시간 동안 측정되었다. 대체로 콘크리트 배합의 압축강도는 고온 상태에서 크게 감소한다. 시험결과 관리기준 배합의 경우 섭씨 200도와 400도로 온도를 올렸을 때 일반적인 실내의 상온(섭씨 25)에서 실시된 같은 콘크리트 배합의 경우와 비교하여 압축강도가 15% 및 23%가 각각 감소하는 것으로 나타났다.

반면에, 10%의 폐화강석 분말을 모래의 대체재로 사용한 친환경 콘크리트 시편의 섭씨 200도와 400도 온도에서의 강도 감소량은 13%와 15%로서 관리기준 배합 콘크리트의 강도 감소량에 비해 대단히 우수한 특성을 나타내었다.

5.3 투수성(Permeability) 시험

투수성 시험결과 시멘트의 5% 및 10%를 폐화강석 분말로 대체할 경우 친환경 콘크리트의 투수성이 개선되었다. 5% 및 10%의 화강석 분말로 대체할 경우 관리기준 배합의 투수계수에 비해 투수계수가 4% 및 8%로 감소되었다. 이것은 아마도 콘크리트 페이스트의 대부분 공극들이 수화작용이 이루어지는 동안 화강석 분말의 미세공 충전 작용(micro-filler action)에 의해 채워지기 때문인 것으로 판단된다.

5.4 흡수성(Water Absorption) 시험

콘크리트의 흡수성은 콘크리트의 품질과 내구성에 대한 가장 중요한 지표 중 하나로 취급된다. 흡수성 시험결과는 투수성 시험결과와 거의 유사한 거동을 나타내었다. (C5) 및 (C10) 샘플의 경우 화강석 분말로 시멘트를 대체하면 콘크리트 샘플의 흡수율이 감소하였다. 이러한 결과는 예상되었던 것으로 화강석 분말의 미세입자의 충전 효과(filling effect)로 인해 모세관 공극(capillary pores)의 크기와 연계성이 감소되기 때문이다. 결과적으로 콘크리트 배합에서 모래를 화강석 분말로 대체함으로써 관리기준 배합에 비하여 흡수율도 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 화강석 분말의 존재가 혼합물의 입도를 개선함으로써 물이 흡수될 수 있는 공극을 최소화하여 보다 잘 다짐이 되도록 한다는 것을 나타낸다.

5.5 SEM

콘크리트 관리기준 배합, 5% 시멘트 대체 배합, 10% 시멘트 대체 및 모래 대체 배합 시편에 대한 다양한 배율의 SEM 이미지는 재령 56일 상태에서 관찰되었다. 본문의 그림에서 검게 나타난 부분들이 조사된 시편의 공극 또는 기포를 나타낸다.

200배로 확대한 관리기준 배합 시편의 SEM 이미지에 많은 공극이 있는 것을 알 수 있다. 800배로 확대한 관리기준 배합 시편의 SEM 이미지에 이러한 공극들 중 하나가 있는데 그 크기는 직경이 상대적으로 큰 $183\mu\text{m}$ 에 달한다. 약한 부분의 공극들 사이에 미세균열을 명확히 관찰할 수 있다.

반면에 200배로 확대한 대체 배합(C5)의 SEM이미지에서는 공극들이 작고 공극의 수도 최소화된 단단한 콘크리트 배합임을 볼 수 있다. 이것은 앞서 우리가 언급한 결과들을 뒷받침하는 것으로 (C5)배합이 모든 배합 가운데 가장 흡수율이 적고 불침투성이 우수하다는 것을 말하는 것이다. (C5)배합의 800배로 확대한 SEM 이미지에서 공극들 중 하나의 직경은 약 $55\mu\text{m}$ 인데 관리기준 배합의 공극 직경에 비해 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

관리기준 배합(CM)과 (C5) 배합을 비교해 볼 때 (C5)배합이 시멘트의 부분 대체재로 화강석 분말을 첨가함으로써 공극은 감소하고 강도는 증가하는 것으로 관찰되었다.

6. 결론

이 보고서의 목표는 폐화강석 분말을 함유하는 친환경 콘크리트의 내구성을 평가하는 것이다. 실험결과 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

- 6.1 폐화강석 분말도가 높고 표면적이 크기 때문에 콘크리트의 물 수요가 늘어나게 되므로 물이 흡수되어 시공연도의 감소가 일어난다.
- 6.2 높은 온도여건 하에서 시멘트의 일부를 폐화강석 분말로 대체한 친환경 콘크리트 (C5)와 (C10)의 압축강도 감소는 일반 콘크리트 배합에서 발생하는 압축강도의 감소보다는 덜했다.
- 6.3 높은 온도여건 하에서 모래의 일부를 폐화강석 분말로 대체한 친환경 콘크리트 (S10)와 (S17)의 압축강도 감소는 일반 콘크리트 배합에서 발생하는 압축강도의 감소보다는 덜했다.
- 6.4 폐화강석 분말로 시멘트의 5-10%를 대체하면 친환경 콘크리트의 투수성이 개선된다.
- 6.5 폐화강석 미립자로 콘크리트 배합의 모래를 10% 및 17% 대체하면 투수계수의 감소로 내구성이 개선되었다.
- 6.6 흡수율 시험결과는 투수성 시험결과와 거의 유사했으며 일정 비율의 시멘트 또는 모래를 폐화강석재로 대체하면 콘크리트 시험체의 흡수율이 감소되는 것으로 나타났는데 이것은 친환경 콘크리트의 품질과 내구성이 우수한 것으로 간주할 수 있다.
- 6.7 관리기준 배합(CM)의 SEM 이미지 또는 현미경 사진에서 비교적 큰 사이즈(직경 $183\mu\text{m}$)의 많은 공극이 나타났다. 미세균열들이 이러한 취약한 공극들 사이로 발생한 것이 명확하게 관찰되었다.
- 6.8 시멘트의 대체재로 폐화강석 분말을 5% 첨가하면 공극의 크기가 최소화되고 공극수가 최소화되면서 치밀한 콘크리트배합이 되는 것으로 나타났다. SEM 이미지를 관찰한 결과 (C5)가 모든 배합 가운데에서 흡수율이 가장 낮고 불투수성이 가장 우수한 것으로 나타났다.
- 6.9 폐화강석재로 콘크리트 배합의 모래를 10% 및 17% 대체하면 특히 (S10) 배합의 경우 관리기준 배합의 경우 보다 공극의 수가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 투수성 및 흡수성 시험결과와 일치하는 내용이다.

이번 연구를 통해 콘크리트 배합에 폐화강석분말을 함유시키는 것이 일부 내구성관련 특성들에 유익하다는 결론을 내릴 수 있다. 또한 시멘트 또는 모래의 대체재로서 폐화강석재 분말을 첨가하면 고온 상태의 콘크리트에 대한 강도증진 측면에서 긍정적인 결과를 나타내는 것으로 밝혀졌다.