

석분슬러지 혼입이 시멘트 모르타르 특성에 미치는 물리적 영향

Physical Effect of Adding Stone Dust Sludge on the Properties of Cement Mortar

서준영¹ · 최선종¹ · 강수태^{1*}

Jun-Yeong Seo¹ · Seon-Jong Choi¹ · Su-Tae Kang^{1*}

(Received June 20, 2015 / Revised June 26, 2015 / Accepted June 27, 2015)

In order to investigate the feasibility of stone dust sludge as fine aggregate, an experimental study was performed on cement mortar with stone dust sludge. Fresh mortar properties and strength with various stone dust sludge replacement ratios were estimated. The replacement ratio adopted in this study was 0, 10, 20, 30%. Flow, air content, and rheological properties were considered as properties of fresh mortar. Compressive strength and flexural tensile strength were measured for strength. The results are as follows. Higher amount of stone dust sludge caused reduction in slump and air content. In the rheological properties, both yield stress and plastic viscosity increased as stone dust sludge content increased up to 20% replacement ratio, but there were no remarkable difference between 20 and 30%. Yield stress increased drastically between 10 and 20%. Compressive and flexural tensile strength results indicated that the strength variation was not significant according to stone dust sludge content, but the strength gain in the early age by adding stone dust sludge was evident. The strength at the age of 28 days however did not show noticeable effect of adding stone dust sludge.

키워드 : 석분슬러지, 시멘트 모르타르, 유동성, 레올로지, 강도

Keywords : Stone dust sludge, Cement mortar, Flowability, Rheology, Strength

1. 서론

1970년대 후반부터 급격하게 증가한 건설수요는 콘크리트 시장을 급속히 팽창시켰으며, 콘크리트 생산 시 필요한 골재의 수요 또한 크게 증가시켰다. 건설산업의 초반에는 대부분 하천골재를 콘크리트 배합용 골재로 사용하였으나, 장기간에 걸친 대량 사용으로 인해 현재는 하천골재가 많이 부족한 상태에 이르렀다. 이러한 하천골재의 부족현상으로 인해 석산에서의 채석을 통한 부순골재의 사용이 불가피하게 되었으며 현재는 콘크리트에 사용되는 골재 중 부순골재가 가장 큰 비중을 차지하고 있다(Fig. 1 참조). 채석을 통해 일차적으로 부순 굵은골재를 생산하는 과정에서 석분 및 석분슬러지의 부산물이 발생하며, 이 때 발생하는 석분은 원석의 약 30%를 차지한다. 그리고 석분으로부터 다시 부순 잔골재를 생산하게 되는데 이 때 석분의 30% 내외로 석분슬러지가 발생하게 된다.

석분슬러지는 입경 0.08mm 이하의 골재 미분말로 Fig. 2와 같다. 석분슬러지는 폐기물인 무기성 오토니로 분류되어 있으며 많은 양이 사장되거나 석분더미로 방치되거나 매립되어 석산 주변의 재해 및 환경문제를 유발할 가능성이 높아 다양하게 활용되지 못하고 있다.

현재 국내 콘크리트표준시방서에 따르면 콘크리트에 사용되는 골재에 대해 0.08mm 이하 골재 미분말의 허용치를 잔골재 질량의 5% 이내를 규정하고 있으며, 부순 잔골재에 대해서도 최대 7%로

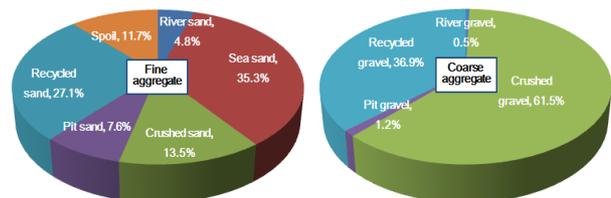


Fig. 1. Distribution of aggregate sources

* Corresponding author E-mail: stkang@daegu.ac.kr

¹대구대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk, 712-714, Korea)

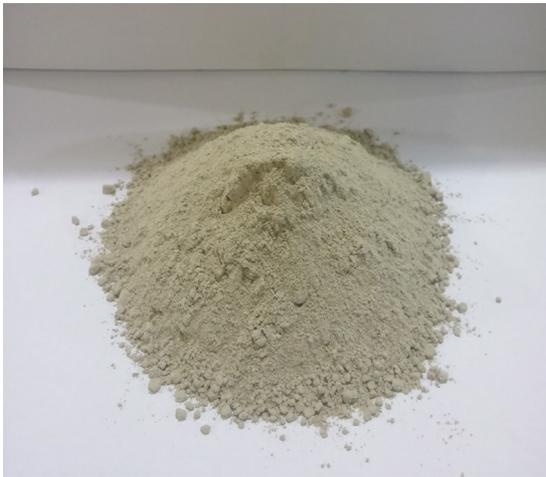


Fig. 2. Stone dust sludge

제한하고 있다. 국외의 경우, ASTM C 33(2013)에서는 국내와 동일한 기준을 사용하고 있는 반면, BS 882(1992)에서는 잔골재 질량의 15% 까지 허용하고 있다. 따라서 현재의 골재 부족문제와 석분슬러지의 매립 또는 처리에 따른 환경문제 등을 개선하기 위한 방안으로 0.08mm 이하의 골재 미분말 또는 석분슬러지의 사용 범위에 대해서 다시 한 번 검토하고 사용량을 확대하기 위한 시도가 의미 있을 것으로 판단된다.

기존의 석분슬러지 관련 연구는 석분슬러지를 시멘트의 일부 치환재로 사용하는 혼화재로서의 용도에 관한 연구가 대부분이다. 기존에 수행된 석분슬러지 활용에 관한 연구를 살펴보면, Lee (2013)은 석분슬러지를 시멘트 치환재로 활용한 콘크리트의 압축강도, 휨강도, 탄성계수 측정, 길이변화 측정을 평가하였으며, 압축강도의 경우 10%범위까지는 강도발현에 큰 문제가 없음을 밝혔다. Koo(1997a; 1997b)은 석분 함유량과 물-시멘트(W/C)비에 따른 콘크리트의 압축강도를 평가하였으며, 압축강도에 대한 최적 석분 함유량 전체질량의 5%이며 10% 이상이면 압축강도가 현저히 떨어진다고 밝힌 바 있다. Lee and Jung(2001)은 석분을 혼화재로 활용한 콘크리트의 압축강도를 평가한 실험에서 압축강도가 석분 혼입량의 증가에 따라 거의 선형적으로 감소된다고 보고한 바 있다. 또 Song et al.(2006)은 석분슬러지를 혼입한 모르타르의 강도 발현 특성에 관한 연구에서 시멘트 대신 석분슬러지 치환율 15%까지는 강도 증진 효과가 있으나 그 이상에서는 강도 저감이 크게 나타난다고 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 석분슬러지를 시멘트의 치환재가 아닌 잔골재의 일부로서 그 영향을 평가하고자 하였다. 잔골재용 재료로 석분슬러지를 일부 이용할 경우 석분슬러지 함량에 대한 시공 지침과 규

격 제정에 참고가 될 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하여 석분슬러지의 혼입 및 혼입량을 실험 변수로 하여, 그 물리적 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 실험

2.1 배합 및 사용재료

석분슬러지의 혼합 여부 및 치환율에 따른 영향을 살펴보기 위하여 석분슬러지의 치환율을 잔골재 질량의 0, 10, 20, 30%로 적용하여 배합 및 타설을 실시하였다. 배합은 KS L ISO 679(2006)에 따라 시멘트와 잔골재의 비는 1:3을 적용하였다. 물-시멘트비는 석분슬러지 치환에 따라 예상되는 유동성 저하 현상을 정확히 파악하고 작업성 불량으로 인한 강도의 변화가 발생하지 않도록 하기 위하여 규정된 0.5보다 큰 0.6을 적용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 모르타르 배합표를 나타낸 것이다.

본 실험에 사용한 시멘트는 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 주문진 표준사를 사용하였으며 표준체로 체가름시험을 통해 구한 입도분포곡선은 Fig. 3과 같다. 대부분의 입자가 0.3~0.5mm 사이 크기를 나타내고 있다. 석분슬러지는 경북지역의 S채석장에서 채취하여 건조 후 사용하였으며 입도분포

Table 1. Mix proportions of cement mortars

Replacement ratio (%)	Mass (kg/m ³)			
	Cement	Water	Sand	Stone dust sludge
0	481.2	288.7	1443.6	-
10	481.2	288.7	1299.2	144.4
20	481.2	288.7	1154.9	288.7
30	481.2	288.7	1010.5	433.1

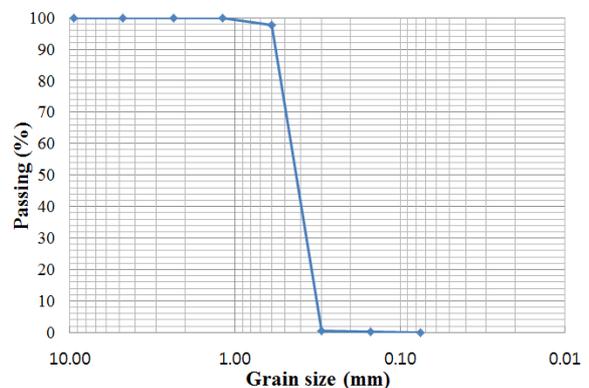


Fig. 3. Particle size distribution of fine aggregate

Table 2. Chemical composition of cement and stone dust sludge

Types	Items	Chemical composition (%)									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
OPC		21.91	5.25	3.51	63.38	2.10	-	-	-	-	-
Stone dust sludge		62.3	13.5	18.0	4.1	0.8	1.1	N.D.	N.D.	0.3	N.D.

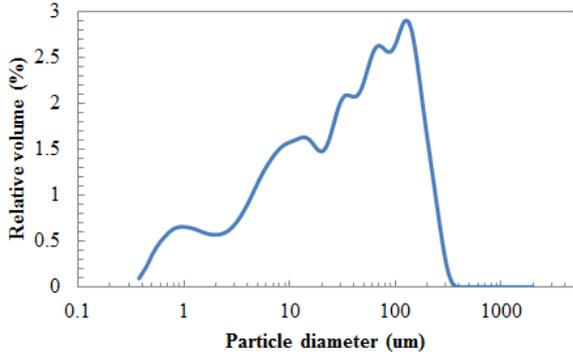


Fig. 4. Particle size distribution of stone dust sludge

곡선은 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 미분말의 석분슬러지 입도분포는 입자 크기 분석기(Particle Size Analyzer, PSA)를 이용하여 얻었으며, 그 결과, 석분슬러지 입자의 평균 크기는 62.35 μ m이며, 입자의 최대 크기는 409.6 μ m임을 확인하였다. 사용된 시멘트와 석분슬러지의 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험체 제작 및 실험방법

배합 후 석분슬러지를 활용한 시멘트 모르타르의 굳지 않은 상태의 특성을 평가하였으며, 강도 특성을 파악하기 위하여 강도 측정용 시험체를 제작하였다.

압축강도 시험체는 KS L 5105(2007)에 따라 50x50x50mm 크기의 정육면체 시험체로 제작하였으며, 휨인장강도 시험체는 의 경우 KS L ISO 679(2006)에 규정된 40x40x160mm 크기의 시험체로 제작하였다. 시험체는 타설 종료 후 24시간 동안 기건 양생 후에 탈형과정을 거쳐 20 \pm 3 $^{\circ}$ C의 수조에서 수중 양생되었으며 3, 7, 14, 28일 재령에 압축 및 휨인장강도 평가를 실시하였다.

굳지 않은 상태 특성 평가는 KS L 5105(2007)에 따른 플로우 시험과 레오미터를 이용한 레올로지 평가 시험, 그리고 공기량 측정 시험을 실시하였다. 레올로지 평가 시험에 사용된 레오미터는 Brookfield DV2T 점도계이며, 레올로지 시험은 0~150rpm 범위에서 각 단계별 10rpm 씩 증가시켜 5초 간격으로 측정하고 또 최대 rpm에 도달 후 다시 10rpm 감소시키면서 측정하는 방법으로 진행

하였으며, 그 측정결과에 대해 Bingham 모델($\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$ 관계식)을 적용한 회귀분석을 통해 항복응력(yield stress, τ_0)와 소성점도(viscosity, μ)를 구하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 플로우 및 공기량

Fig. 5와 Fig. 6은 굳지 않은 모르타르에 대하여 미니슬럼프 테스트 결과와 공기량 측정 결과를 나타낸 것이다.

플로우 측정결과를 살펴보면 석분슬러지의 치환율이 증가함에 따라 플로우 값이 감소하는 결과를 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 상대적으로 입경이 큰 잔골재 대신 입경이 매우 작은 석분슬러지

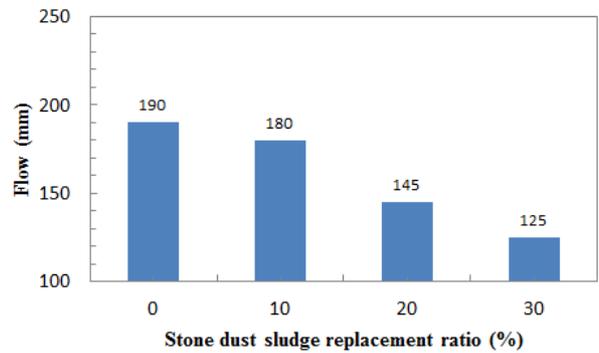


Fig. 5. Stone dust replacement ratio vs. flow

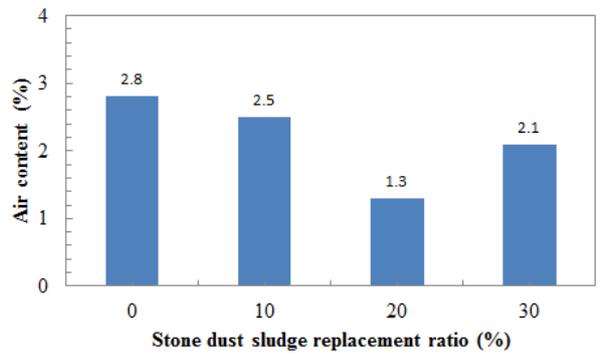


Fig. 6. Stone dust replacement ratio vs. air content

를 일부 치환함으로써 석분슬러지를 포함한 잔골재의 표면적이 크게 증가하게 되고 그 결과 잔골재에 흡착되는 수량이 증가하였기 때문이다. 또한 잔골재와 매트릭스의 부착 전체 표면적이 넓어짐에 따라 소요되는 시멘트 페이스트가 증가하게 되어 골재 입자 사이에서 윤활 역할을 하는 수량이 부족하게 되기 때문이다. 모래의 조립률이 감소함에 따라 소요 워커빌리티 확보에 필요한 단위수량이 증가하는 것과 같은 맥락이다.

공기량 결과에서는 대체적으로 석분의 치환율이 증가할수록 공기량이 감소하는 것으로 나타났다. 잔골재로 사용된 표준사가 0.3~0.5mm의 좁은 범위 내 입경분포를 가지며, 석분슬러지는 0.5~100 μ m 범위가 입경분포를 가지고 있다. 따라서 작은 입경 크기의 석분슬러지를 치환하여 사용함으로써 잔골재의 입도분포가 상대적으로 양호하게 되고 단일입경 크기의 잔골재들 사이의 공극을 적절히 메우게 되고, 그 결과 공기량이 감소하게 된 것으로 판단된다. 실험변수의 설정값 0~30% 범위 내에서 석분슬러지 치환율이 20%일 때 공기량이 가장 작은 것으로 나타났다.

석분슬러지 사용으로 인한 유동성 저하 및 공기량 감소는 근래 성능이 크게 향상되어 소량의 투입으로도 역학적 성능 저하 없이 소요 성능을 개선하는데 효과적인 고성능의 유동화제나 AE제 등의 첨가로 충분히 개선할 수 있을 것으로 판단되며, 또는 플라이애쉬 등의 광물질 혼화재를 혼합하여 사용하는 방법도 개선방안이 될 수 있을 것이다.

3.2 레올로지 특성

잔골재의 0~30% 석분슬러지 치환에 따른 레올로지 특성 평가를 위해 수행한 레올로지 실험으로부터 얻은 유동곡선(flow curve)은 Fig. 7이다. 대체적으로 Bingham 유체의 선형 유동곡선의 특성을 명확히 확인할 수 있다. 석분슬러지 치환율이 증가함에 따라 유동곡선의 기울기가 증가하고 y절편의 값도 상승하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 결과를 석분슬러지 치환율에 따른 소성점도 및 항복응력의 변화로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 그 결과를 살펴보면, 석분 슬러지의 잔골재에 대한 치환율이 0, 10, 20, 30%로 증가할수록 항복응력이 증가하는 것으로 나타났으며, 치환율 10%는 치환하지 않은 경우에 비해 항복응력에 큰 차이가 없었으나 20% 치환에서는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이 같은 경향은 플로우 실험결과와 경향과도 유사하다. 소성점도의 결과에서는 석분슬러지의 잔골재에 대한 치환율 20%까지는 선형에 가까운 증가 경향을 보였으며, 치환율 30%에서는 오히려 약간 감소하는 결과를 보였다.

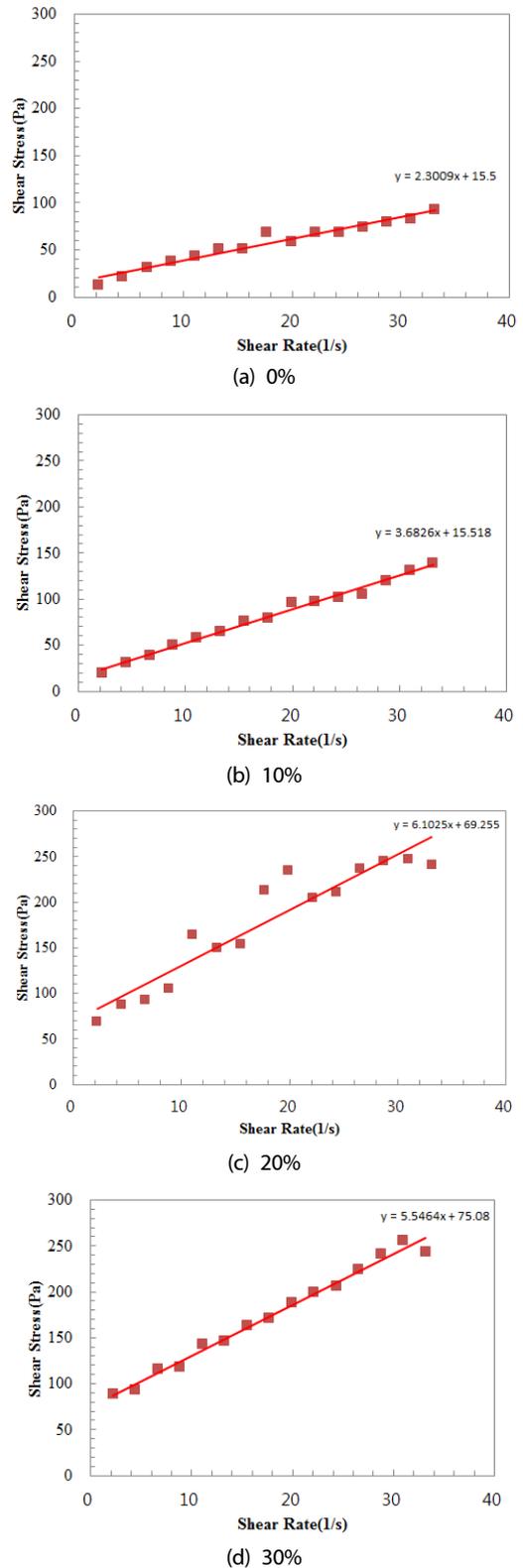


Fig. 7. Flow curves with different replacement ratios of stone dust sludge

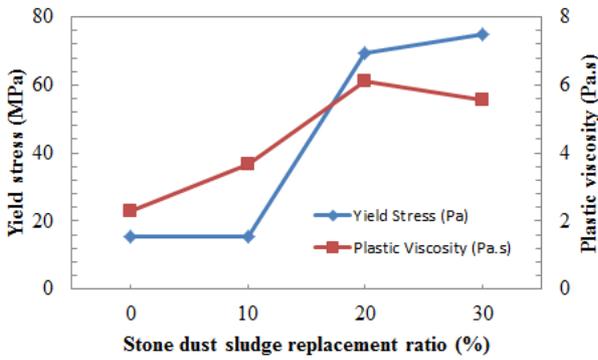


Fig. 8. Yield stress & plastic viscosity with different replacement ratios of stone dust sludge

3.3 압축강도

잔골재의 일부를 치환율을 달리하여 석분슬러지로 치환한 배합으로 50x50x50mm 크기의 시험체로 재령 3, 7, 14, 28일에 압축강도를 측정하였다. Fig. 9는 석분슬러지의 치환율에 따른 재령별 압축강도 측정 결과를 나타낸 것으로, 각 재령별에 대한 시험결과는 시험체 4개의 평균값을 사용하였다. 초기재령인 재령 3일에서는 석분슬러지를 혼입하지 않은 경우에 비해 석분슬러지를 10, 20, 30% 치환함에 따라 강도가 각각 1.4%, 8.6%, 6.1% 증가하는 결과를 보였다. 그리고 재령 7일에서는 강도 증진 폭이 각각 -3.0%, 0.2%, 2.8%로 줄어들었으며, 재령 14일에서도 20% 치환한 경우를 제외하고는 대략 3% 전후로 강도가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 재령 28일에서는 치환율 30%에서만 2.2% 정도의 강도 증진 효과가 나타났으며, 10% 및 20%에서는 -6.0% 정도로 강도가 감소하는 결과를 보였다.

석분슬러지의 치환율과 재령별 압축강도를 전체적으로 살펴본 것을 보면, 석분슬러지를 잔골재 치환재로 사용함으로써 인한 압축강도의 변화는 크게 나타나지 않았으며, 치환율 0~30% 범위 내에서는 치환율에 따른 강도변화도 크지 않은 것으로 판단된다. 초기재

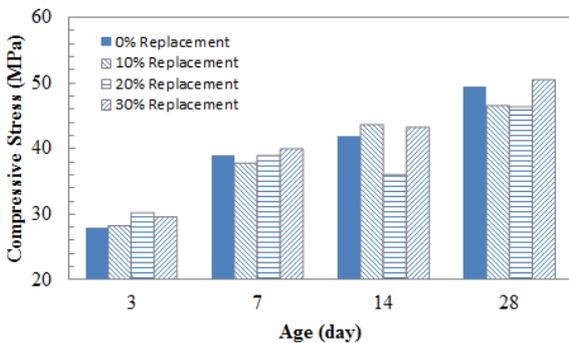


Fig. 9. Compressive strengths with age

령에서는 석분슬러지를 잔골재의 일부로 사용함으로써 강도증진 효과를 볼 수 있었던 반면에 28일 재령에서는 오히려 강도가 약간 저하되는 경향을 나타내었다. 재령 28일의 강도에서 석분슬러지를 잔골재 질량의 30% 치환하더라도 강도가 약간 감소하기는 하지만 큰 변화는 없는 것으로 판단된다. 다만 28일 이후의 장기재령에서의 강도특성을 파악하기 위해서는 추가적인 평가가 필요할 것이다.

3.4 휨인장강도

Fig. 10에서는 석분 슬러지 치환율에 따른 재령별 휨인장강도 결과를 나타내었다. 각 재령별 시험결과는 시험체 3개의 강도결과 평균값을 사용하였다.

초기재령인 재령 3일의 경우 석분 슬러지를 혼입하지 않은 경우에 비해 석분슬러지를 10, 20, 30% 치환하였을 때 휨인장강도가 각각 9.0%, 20.8%, 10.8% 증진되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 재령 3일에서의 압축강도 결과와도 동일한 경향을 보이는 것이다. 그리고 재령 7일에서는 3.4~7.2% 정도의 강도증진 효과가 나타난 반면에, 재령 14일에서는 치환율 10, 20%에서는 상대적으로 큰 강도를 보였으나 치환율 30%를 적용한 경우에는 석분슬러지를 사용하지 않은 경우에 비해 강도가 감소하는 결과를 보였다. 재령 14일의 경향은 재령 28일에서의 휨인장강도 결과에서도 거의 유사하게 나타났다. 치환율 10, 20%의 상대적 강도 크기는 재령 14일과 비교했을 때 서로 역전된 결과를 나타내었지만, 여전히 석분슬러지를 사용하지 않은 경우보다 큰 휨인장강도를 나타낸 반면, 치환율 30%에서는 강도가 약간 작은 값을 보였다.

대체적으로 압축강도 결과에서와 마찬가지로 초기재령에서는 석분슬러지를 치환한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 뚜렷한 강도증진 효과를 볼 수 있었으며, 재령이 증가함에 따라 강도증진 비율은 점차적으로 감소하였고, 재령 14일 이후에 치환율 30%는

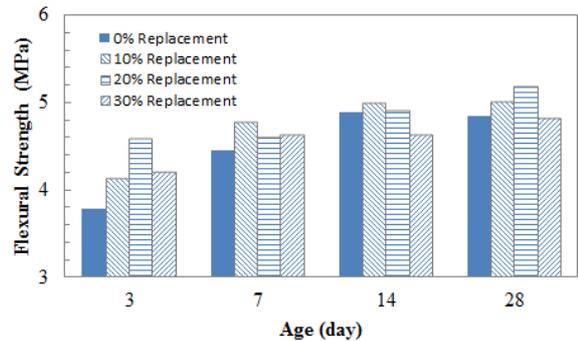


Fig. 10. Flexural tensile strength with age

치환하지 않은 경우에 비해 상대적으로 작은 강도를 나타내었지만 그 차이는 미미한 것으로 나타났다.

압축강도와 마찬가지로 장기재령에서의 영향을 추가적으로 살펴볼 필요가 있다.

4. 결론

이 연구에서는 산업폐기물인 석분슬러지를 잔골재의 일부로 활용하고자 하는 목적의 실험연구의 일환으로, 잔골재를 대신한 석분슬러지의 치환율에 따른 시멘트 모르타르의 굳지 않은 상태의 특성과 압축강도 및 힘인장강도 변화를 실험적으로 살펴보고 그 결과는 다음과 같다.

1. 석분슬러지를 잔골재 치환재로 활용한 굳지 않은 모르타르의 공기량 변화는 석분슬러지의 치환율이 증가할수록 공기량이 감소하는 것으로 나타났으며 이는 4.75mm이하의 잔골재 보다 입도가 작은 석분슬러지가 잔골재 사이의 공극을 채워 공기량이 감소한 것으로 판단된다.
2. 플로우 실험결과에서도 잔골재에 대한 석분슬러지의 치환율이 증가함에 따라 플로우 값이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 골재의 입자가 작을수록 단위수량의 흡수량이 증가하는데 잔골재보다 입도가 작은 석분슬러지의 치환량이 증가할수록 골재에 흡수되는 단위수량이 증가하였기 때문이다.
3. 석분슬러지를 활용한 모르타르의 레올로지 특성에서는 항복응력과 소성점도가 석분슬러지의 치환율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 항복응력은 10% 치환율까지는 미소한 증가를 보인 반면 20% 치환율에서 급격하게 증가하는 결과를 보였으며, 소성점도는 치환율 20%까지 선형에 가까운 증가경향을 보였다. 치환율 20%와 30% 사이에서는 큰 차이를 보이지 않았다.
4. 압축강도의 실험결과, 잔골재의 일부분을 석분슬러지로 대체한 경우는 치환율 0~30% 범위 내에서는 치환율에 따른 강도 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 10%, 20%, 30%의 결과는 압축강도가 모두 증가하였고 이로 인해 석분슬러지를 혼입한 경우에 강도발현에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 초기재령에서는 석분슬러지 치환에 따른 강도증진 효과를 볼 수 있었던 반면에 28일 재령에서는 오히려 강도가 약간 저하되는 경향을 나타내었다. 하지만 30% 치환해서 사용하더라도 강도손실은 미미한 것으로 나타났다.
5. 힘인장강도의 실험결과에서도 초기재령에서는 석분슬러지를

치환한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 뚜렷한 강도증진 효과를 보였으며, 재령이 증가함에 따라 강도증진 비율은 점차적으로 감소하였고, 재령 14일 이후에 치환율 30%는 치환하지 않은 경우에 비해 상대적으로 작은 강도를 나타내었다.

6. 잔골재와 혼합하여 석분슬러지를 사용에 따른 영향을 장기적 관점에서 검토하기 위해서는 28일 이후의 장기재령에서의 강도변화 평가와 미분 형태의 석분슬러지 사용에 따른 장기적인 체적안정성에 대한 평가 등이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(14RDRP-B076268)에 의해 수행되었습니다.

References

ASTM C33 / C33M-13, (2013), Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org

BS 882, (1992), British Standard Specification for aggregates from natural sources for concrete, British Standards Institution, Koo, H.S. (1997a), A study on concrete compressive strength in change of stone dust content(I), Theses Collection of the Research Institute of Engineering Technology in Kyungnam Universtiy, **14(2)**, 387-396 [in Korean].

Koo, H.S. (1997b), A study on concrete compressive strength in change of stone dust content(II), Theses Collection of the Research Institute of Engineering Technology in Kyungnam Universtiy, **14(2)**, 397-406 [in Korean].

KS ISO 679, (2006), Methods of testing cements – determination of strength, Korean Standards Association [in Korean].

KS L 5105, (2007), Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar, Korean Standards Association [in Korean].

Lee, J.H. (2013), Mechanical properties of concrete using crushed stone sludge as substitute, MS thesis, Chungbuk National University, Korea [in Korean].

Lee, S.H., Jung, Y.W. (2001), Properties of the super flowing concrete using crushed stone fines, Journal of the Korea Concrete Institute, **13(5)**, 476-483 [in Korean].

Song, J.H., Lim, S.Y., Jung, J.D. (2006). A study on the properties of mortar flowability and strength development using sludge

of crushed stone, Proceedings of the Architectural Institute of Korea, **26(1)**, 405-408 [in Korean].

석분슬러지 혼입이 시멘트 모르타르 특성에 미치는 물리적 영향

본 연구에서는 잔골재의 일부 대체재로 석분슬러지의 활용가능성을 살펴보기 위해서, 석분슬러지 활용 시멘트 모르타르에서 석분슬러지 치환율 변화에 따른 굳지 않은 상태 물성과 강도 변화 실험을 수행하였다. 치환율은 0, 10, 20, 30%를 고려하였으며, 굳지 않은 상태 물성으로는 슬럼프, 공기량, 레올로지 특성을 평가하였으며, 강도는 압축강도 및 휨인장강도를 평가하였다. 그 결과, 슬럼프 및 공기량은 석분슬러지 치환율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 레올로지 특성에서는 치환율 20%까지는 항복응력 및 소성점도 모두 증가하는 것으로 나타났지만, 치환율 30%에서는 20%와 큰 차이가 나지 않았다. 항복응력의 경우 10%에서 20% 사이에서 증가율이 크게 나타났다. 압축강도 및 휨인장강도 결과에서는 석분슬러지 치환율에 따른 강도변화는 크게 나타나지 않았지만, 석분슬러지를 혼입할 경우 초기재령에서는 강도증진 효과가 명확히 나타났으며 28일 재령에서는 석분슬러지를 사용하지 않은 경우와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.