

관거의 기초 및 뒷채움재로 활용하기 위한 석분의 공학적 특성

Engineering Characteristics of Crushed Rock for Foundation and Backfill Materials of a Conduit

문홍득[†] · 김대만^{*}

Moon, Hongduk[†] · Kim, Daeman^{*}

Abstract

In this study, basic physical tests and mechanical tests of crushed rock were performed in order to investigate the field application of crushed rock as substitute materials of sand that is commonly being used as foundation and backfill materials of sewer conduit. Particle-size distribution curve of crushed rock is similar to sand and also it is well-graded soil than common sand. Maximum dry unit weight in proctor compaction test for crushed rock is higher than the values of common sand. So we can estimate that the crushed rock has advantages in workability than sand for the backfill compaction after construction of sewer conduit. When we investigate the results of direct shear test and triaxial compression test on the crushed rock, it has a similar value of shear strength parameters to sand at the same stress state and as time goes by, it tends to increase the unconfined compression strength. But, because the strength reaches at the constant value after 6~7 days, we expect that it can absorb the lateral strain of flexible conduit well. All the above experimental results just proves that crushed rock can substitute for sand as backfill materials and foundation of sewer conduit.

Keywords : Sand, Crushed rock, Mechanical test, Backfill materials, Sewer conduit

요 지

본 연구에서는 하수관거의 기초나 뒷채움재로 많이 사용되고 있는 기존의 모래를 대체할 재료로써 석분의 적용가능성을 평가하기 위하여 석분재료에 대한 기본적인 물리적, 역학적인 특성실험을 실시하였다. 석분의 입도분포는 모래보다 더 좋은 상태를 나타내며, 다짐실험 결과도 모래보다 강도특성이 좋은 것으로 나타났다. 이러한 실험결과로부터 하수관거의 기초 및 뒷채움재로써 석분은 현장적용성이 우수한 것으로 평가되며, 이를 뒷받침하기 위하여 직접전단시험, 삼축압축시험을 실시하여 강도특성을 분석한 결과 모래의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 석분의 경우 일축압축강도 특성은 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 경향을 보이지만 6~7일 경과 후에는 거의 일정한 값을 보이는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 실험결과로부터 석분도 하수관거의 기초 및 뒷채움재로 충분히 활용할 수 있는 재료로 평가되었다.

주요어 : 모래, 석분, 역학시험, 뒷채움재, 하수관거

1. 서 론

최근 fly ash, 고로 slag, 제강 dust, 석분 등 산업폐기물이나 부산물들의 처리에 따른 환경문제의 심각성과 함께 이들을 건설재료로 활용하는 방안들이 적극적

으로 모색되고 있다. 이 중 석분은 쇄석골재 생산에 따른 부산물로서 crusher를 통해 파쇄된 원석에서 상품화되는 골재를 제외한 나머지 찌꺼기 부분을 말한다. 또한 도로공학적인 측면의 도로포장재료로서의 석분은 석회암분말, 시멘트, 또는 화성암류를 분쇄한 것으로

[†] 정회원, 국립진주산업대학교 토목공학과 부교수(E-mail : hdmoon@jinju.ac.kr)

^{*} 비회원, 국립진주산업대학교 토목공학과 겸임교수

면지, 진흙, 유기물, 덩어리진 미립자가 함유되어 있지 않은 것으로 도로포장시 굵은 골재와 잔골재의 틈 사이를 메워서 아스팔트의 소요량을 줄이고 아스팔트의 안정성과 내노화성을 높이는데 있어 중요한 재료로 이용되고 있다. 석분은 어느 정도의 세립분이 섞인 것과 입도 패턴의 변동이 다소 클 수 있다는 점을 제외하고는 기본적으로 같은 원석에서 나온 것이므로 그 질이 상품화되는 골재에 비하여 크게 떨어지지 않는다. 전체 원석의 약 1/3 가량이 석분으로 버려진다는 것을 생각하면 환경문제 뿐 아니라 자원의 낭비측면에서도 석분의 활용방안이 적극 모색되어야 할 것이다.

일반적으로 하수도 시설기준에서는 하수관거의 기초 및 뒷채움재로서 모래를 사용하도록 권고하고 있으나 많은 양의 모래를 구하기 어려워 점차 석분과 같은 대체 재료의 활용성에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 하수관거의 기초 및 뒷채움재로서의 석분의 활용성을 평가하기 위하여 관련 시험을 통하여 제반 공학적 특성을 분석하였고, 이를 일반 모래의 특성과 비교 분석하였다.

2. 실내시험 및 결과분석

본 연구에서는 일반적으로 하수관거의 기초 및 뒷채움재로서 많이 사용되고 있는 모래 대신 대체 재료로서 석분의 활용가능성을 알아보기 위해 석분의 기본적인 특성을 파악하기 위한 기본적인 토성시험(입도분석 시험, 액성 및 소성한계시험, 비중시험)과 모래와의 역학적 거동특성을 비교분석하기 위한 역학적인 시험(다

짐시험, 직접전단시험, 일축압축시험, 삼축압축시험 등)을 함께 실시하였다. 이와 같이 시험된 결과는 모래의 일반적인 특성과 상호 비교·분석 하였다.

2.1 석분의 기본적인 물성시험 결과

2.1.1 입도분석 시험

일반적으로 모래의 경우는 구성하고 있는 입자들의 크기가 비교적 균등하여 입도분포곡선의 형태는 빈입도의 형태를 나타내는 것이 특징이다. 본 연구에서 시험한 석분의 입도분석 시험결과를 그림 1에 일반적인 모래의 입도분포와 함께 나타내었다. 입도분포곡선에서 알 수 있는 바와 같이 입자의 크기에 있어서는 모래와 유사한 특성을 가지고 있는 것으로 나타나고 있으나 입도분포곡선의 형태는 모래의 그것보다 양호한 입도를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

석분의 입도분석을 위한 체분석 시험 결과, #200체 통과율은 2% 이하로 나타나 세립성분이 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 모래의 경우와 그 특성이 유사하다. 또한 석분의 경우 모래입자의 크기에 해당되는 부분은 전체의 약 92.5%를 차지하였고, 균등계수(Cu)는 8.2, 곡률계수(Cg)는 1.16으로 나타나 입도분포가 좋은 것으로 분석되었다. 따라서 통일분류법에 의한 분류(USCS)는 SW로 분류되어 입도분포가 좋은 모래질(well-graded sand)로 분류되었다. 모래의 경우 통일분류법에 의한 분류는 SP로 분류되는 것이 일반적이다(Das, 1990).

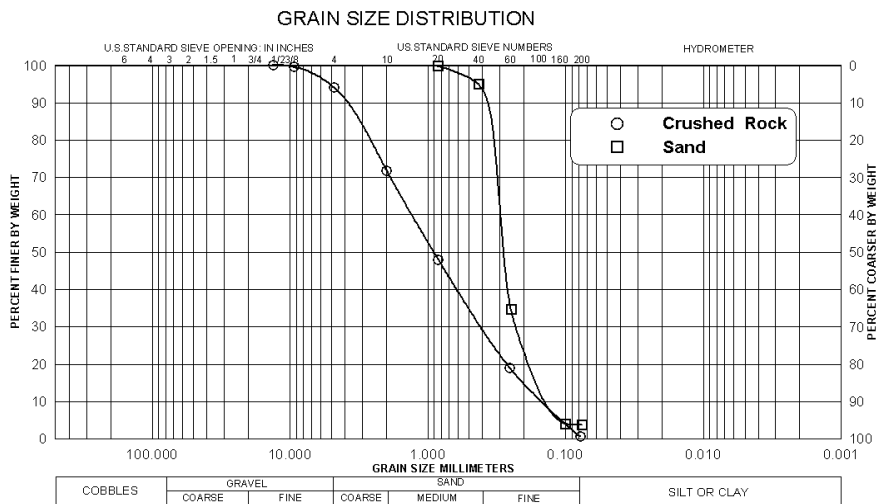


그림 1. 석분 및 모래의 입도분포곡선

2.1.2 액성한계(LL) 및 소성한계(PL) 시험

액성한계 및 소성한계 시험은 시험재료의 소성특성을 파악하기 위해 실시하는데, 석분재료는 실트질 또는 점성토의 성분이 거의 포함되어 있지 않은 비소성(NP)으로 분류되었다. 이는 모래의 경우와 동일한 특성을 가진다.

2.1.3 비중시험

석분재료의 비중시험은 모래의 경우와 동일하게 잔골재의 비중 및 흡수율 시험방법인 KS F 2504를 따라 실시되었으며, 석분의 평균비중은 2.68 정도인 것으로 나타났다(표 1). 이 값은 일반모래의 비중값(2.65)에 비하여 조금 큰 값을 나타내고 있다. 표 1에서처럼 일반적으로 석영으로 구성된 밝은 색깔을 띠는 모래의 비중은 대략 2.65 정도로 추정하고 있으며(Das, 1990), 낙동강 모래를 대상으로 한 연구에서 모래의 비중은 2.65 정도로 나타났으며(김병탁, 1993), 을숙도 지역의 모래를 대상으로 얻어진 비중은 2.64 정도(송준혁, 2002)로 3개소 모두 본 연구의 석분 보다 약간 작은 값을 나타내고 있다.

표 1. 모래와 석분의 비중 및 통일분류(USCS) 비교

시료명	비중(G_s)	통일분류(USCS)
본 연구에 사용된 석분	2.68	SW
석영질을 다량 함유한 모래 (Das, 1990)	2.65	-
낙동강 모래(김병탁, 1993)	2.65	SP
을숙도 모래(송준혁, 2002)	2.64	SP

2.2 석분의 역학적 시험 결과

2.2.1 다짐시험

석분의 다짐시험 결과는 그림 2와 같이 일반적인 양질토사의 경우와 유사한 특성을 가지고 있다. 본 연구에서 시험한 석분의 경우는 표준다짐(A)시험 결과 최대건조단위중량이 약 $2.0t/m^3$ 이며, 최적함수비는 약 10.9% 정도인 것으로 나타났다. 그리고 최대건조단위중량의 90%의 건조단위중량은 $1.8t/m^3$ 으로 일반토사나 모래의 경우보다 큰 값의 건조단위중량이 얻어짐

을 알 수 있다. 이러한 현상은 석분의 구성성분이 주로 깬돌로 이루어져 있고, 또한 입도분포가 모래보다 좋기 때문에 다짐이 잘 된다는 것을 알 수 있다. 여기서 석분의 경우 최대건조단위중량의 90% 이상의 다짐상태를 유지하기 위한 함수비 범위는 약 6.8%~17.3% 정도인 것으로 나타나고 있다. 그런데 모래의 경우 최대건조단위중량은 석분의 경우와 비교할 때 뚜렷한 최대값을 나타내지 않고 일정한 함수비 범위에서는 비교적 유사한 크기의 건조단위중량 값을 나타내고 있어 최적다짐이 어렵다는 것을 알 수 있다. 그리고 최대건조단위중량 값은 석분에 비해 훨씬 작은 값을 나타내지만 최대건조단위중량 값에 근접하는 함수비의 범위는 그림 3의 남강변 모래의 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 약 8.5%~15.0% 정도이며 이러한 함수비 범위에서 가장 잘 다져진다는 것을 볼 때, 석분과 모래의 다짐은 약 8%~15% 정도의 함수비를 유지하면 충

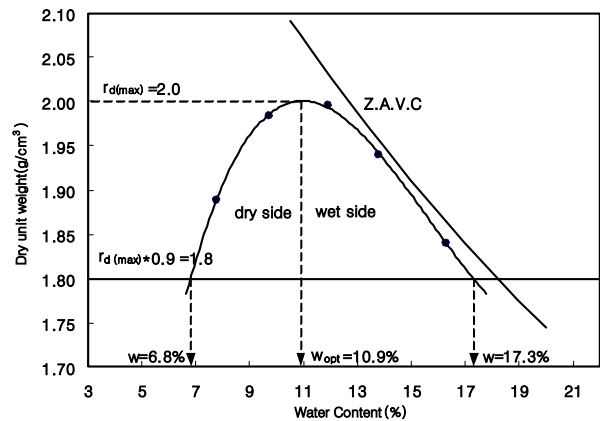


그림 2. 석분의 다짐시험결과

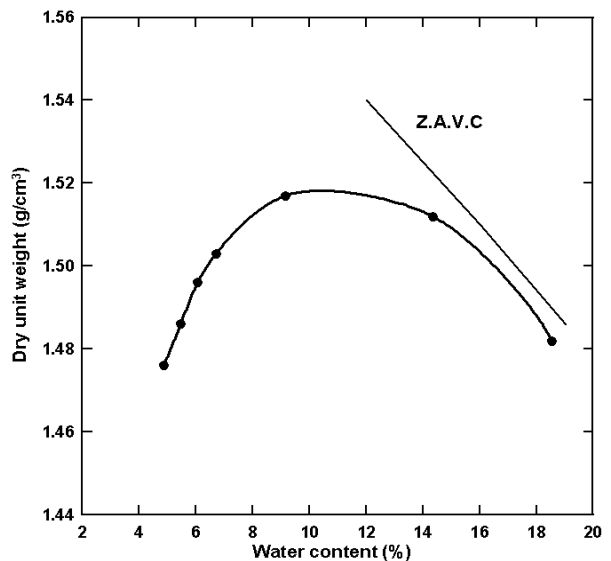


그림 3. 남강 모래의 다짐시험결과

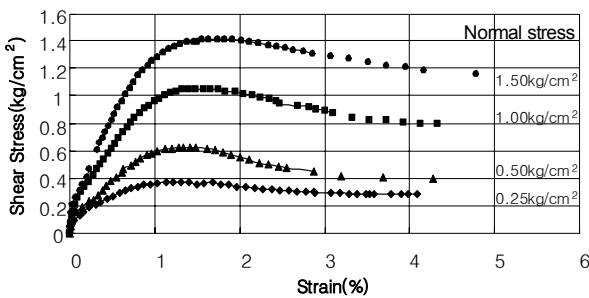
분한 다짐이 될 것이라 판단된다.

국내 토목공사 표준 일반 시방서(건설교통부, 1996)의 관거공 편에는 뒷채움 및 관거 상단의 다짐도를 95%로 규정하고 있는데 비해 국내 하수도 공사 시방서에는 명확한 다짐도 규정을 제시하지 않고 다만 상부 구조물의 특성에 따라 다짐도를 달리 하도록 하고 있다. 반면 AASHTO T-99와 OHBCD에서는 뒷채움을 90% 이상의 밀도로 다지도록 권장하고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 매설하는 관거가 연성관일 경우 뒷채움한 모래의 다짐상태가 극히 나쁠 때에는 연성관이 횡방향으로 변형이 일어나게 되고 이때 변형을 적절히 억제하지 못하면 과도한 변형으로 인하여 관 자체의 파괴를 가져올 수 있기 때문에 어느 정도 다짐이 잘되는 재료를 사용하는 것이 시공성 등을 고려할 때 보다 유리할 것으로 판단된다.

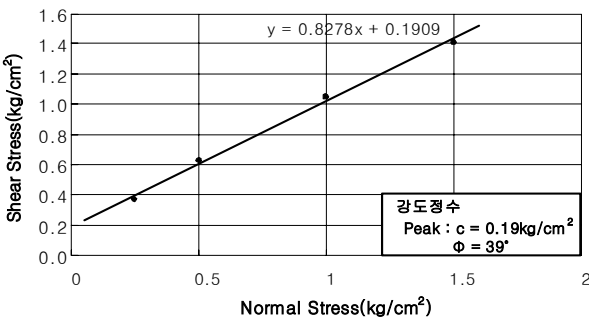
이러한 실험결과를 고려해 볼 때 하수관거의 뒷채움 재료로서 모래 대신 석분을 사용한다면 하수관거 시공 후 뒷채움재의 다짐에서는 오히려 모래보다 석분이 시공성 측면에서는 보다 유리할 것으로 판단된다.

2.2.2 직접전단시험

직접전단시험은 모래와 석분을 상호 비교하기 위해



(a) 전단응력-변형을 관계

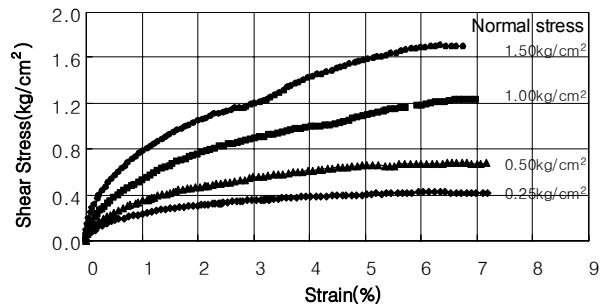


(b) 수직응력-전단응력 관계

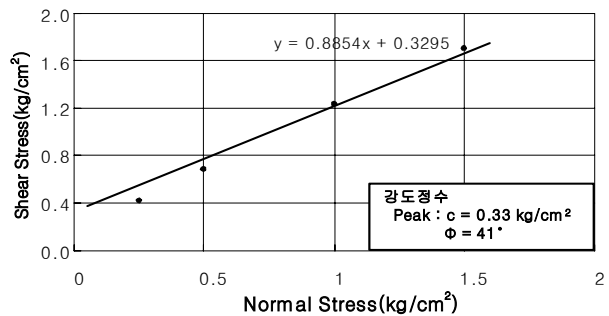
그림 4. 모래의 직접전단시험 결과

동일한 시험조건에서 시험을 실시하였다. 시료성형은 최대건조단위중량의 90% 조건으로 시료를 만든 후 전단시험을 실시하였다. 먼저 모래의 전단시험 결과인 그림 4를 살펴보면 전형적인 사질토의 거동특성을 보여주고 있는데, 수직응력의 크기가 커질수록 파괴시 전단저항강도 값은 커지며, 또한 극한강도까지 증가하다가 잔류응력 상태를 나타내고 있다. 그러나 석분의 경우 전단응력-변형을 곡선은 그림 5처럼 뚜렷한 피크(peak)강도를 보이지 않고 약간씩 증가되면서 전단이 발생하고 있다. 그림 6은 본 연구에 사용된 모래와 석분의 전단시험 결과를 상호 비교한 그림이다. 그림에서처럼 석분의 전단강도 정수가 모래보다 약간 크게 나타났으나 그 차이는 크지 않다.

표 2는 모래와 석분의 전단강도 시험결과를 상호 비



(a) 전단응력-변형을 관계



(b) 수직응력-전단응력 관계

그림 5. 석분의 직접전단시험 결과

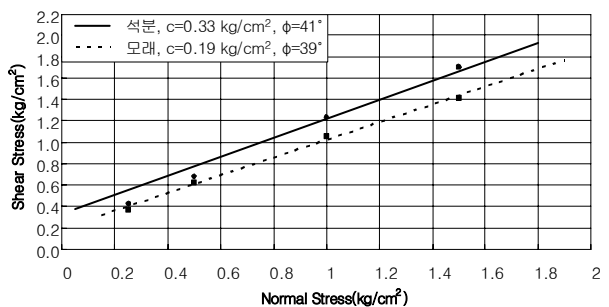


그림 6. 모래와 석분의 직접전단시험 결과 비교

표 2. 모래와 석분의 직접전단시험 결과 비교

시험재료	항목	점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)	수직응력 크기에 따른 전단파괴시 최대 값(kg/cm ²)			
				0.25	0.5	1.0	1.5
모래		0.19	39.0	0.39	0.62	1.08	1.42
석분		0.33	41.0	0.42	0.69	1.21	1.71

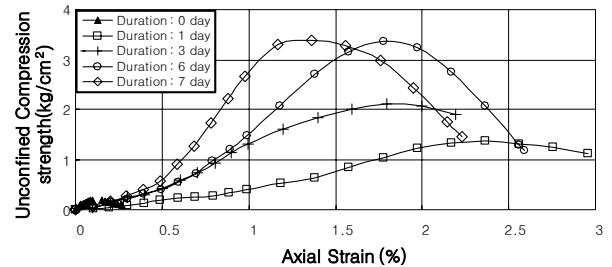
교한 것이다.

이러한 모래와 석분의 직접전단시험 결과는 하수관 거가 연성관인 경우 시공된 하수관거 상부의 수직하중에 의해 연성관이 횡방향으로 변형을 일으킬 경우 인접한 뒷채움재인 모래나 석분이 다짐된 상태에서 어느 정도의 저항을 하면서도 극한상태에서는 연성관 자체의 강도보다 크지 않아 횡방향의 변형을 흡수할 수 있어야 한다. 이러한 측면에서 보면 모래와 석분의 직접전단시험 결과는 서로 동일한 수직응력 상태에서 비슷한 전단파괴강도를 가지고 있기 때문에 연성관의 횡방향 변형을 충분히 잘 흡수할 수 있을 것이다.

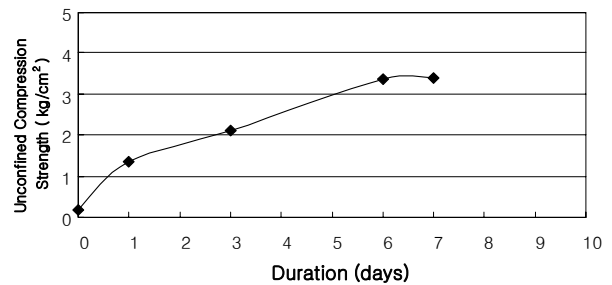
2.2.3 일축압축강도시험

일축압축강도는 전단강도와 마찬가지로 석분의 강도를 파악하는데 있어 중요한 시험항목이다. 모래와는 달리 석분은 다짐 후 시간이 경과함에 따라 점점 강도가 증가하는 경향이 있다. 그리고 실제로 하수관거 기초나 뒷채움재로 석분을 사용하였을 때 지반에 지하수 변동이 없어서 점차 건조해 지는 경우에는 다짐된 석분지반의 강도가 아주 큰 상태로 변해 연성관 자체의 강도보다 크게 된다면 변형흡수를 통한 연성관에 작용하는 하중저감 효과를 제대로 발휘하지 못할 수도 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 다짐된 석분이 시간이 경과함에 따라 압축강도가 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 다짐시험에 의한 최대건조단위중량의 90% 상태로 다짐을 하여 공시체를 만든 후 공시체 제작 직후(0일)와 1일, 3일, 6일, 7일 등 시간 경과에 따른 압축강도 변화를 알아보기 위한 일축압축강도 시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 7과 같다.

그림에서와 같이 공시체 제작 직후인 0일의 경우 매우 작은 변형상태에서 파괴가 발생하였기 때문에 명확히 구분이 어렵지만 낮은 압축강도를 나타내었는데 비해 1일에서 6일까지는 시간이 지날수록 점차 강도가



(a) 일축압축응력-축변형을 관계



(b) 시간경과에 따른 석분의 일축압축강도 변화

그림 7. 시료성형 후 시간 경과에 따른 석분의 일축압축강도 변화

증가하는 특성을 보여주고 있다 그러나 그 증가율은 시간이 경과함에 따라 점차 감소함을 알 수 있으며 6일 및 7일 후의 일축압축강도는 거의 일정한 값에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 시간이 경과한다 하더라도 더 이상의 강도 경화현상은 나타나지 않을 것으로 판단된다. 그리고 실제로 현장에서는 하수관거 하부에 석분으로 기초와 뒷채움을 했을 때 주변 지반과 다짐된 석분이 본 실험에서 가정한 경우와 같이 아주 건조한 상태의 함수비 상태로 변하지 않기 때문에 현재 시험한 6일 경과 후의 강도로 판단해도 크게 문제는 되지 않을 것으로 생각된다.

표 3은 시간 경과에 따른 석분의 일축압축강도 값의 변화를 나타낸 것이다.

표 3. 공시체 제작 후 시간 경과에 따른 석분의 일축압축강도 변화

공시체 제작 후 경과 일수	0 일	1 일	3 일	6 일	7 일
일축압축강도 값(kg/cm ²)	0.18	1.36	2.09	3.36	3.38
파괴시의 변형율(%)	0.1	2.3	1.8	1.7	1.3

2.2.4 삼축압축강도시험

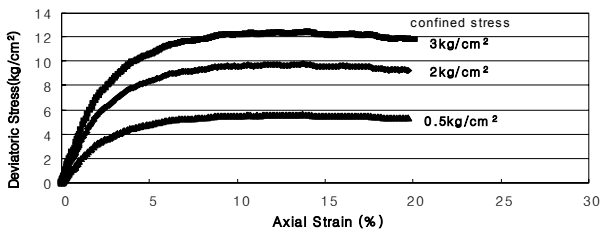
모래와 석분의 구속압에 따른 압축강도 특성을 알아보기 위해 삼축압축시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 삼축압축시험기는 미국 GEOCOMP사에서 제작된 장치로 등방압밀, 이방압밀, K_0 압밀을 이용한 압축 및 인장 삼축시험이 가능한 장치이며, 변형제어 및 응력제어가 모두 가능하다. 동시에 일정 동수경사 투수시험 및 CRS압밀 시험을 자동으로 수행할 수 있는 다기능 시험기이다.

모래와 석분의 시료성형은 일축압축시험과 동일하며 다짐시험에서 구한 최대건조단위중량의 90% 조건으로 정적다짐몰드를 이용하여 시료를 성형한 다음 추출하여 사용하였다. 시험방법은 모래와 석분에 대해 각각 3개의 구속압(0.5, 2.0, 3.0kg/cm²)에 대해서 시험을 실시하였다. 또한 초기 시료의 포화를 위하여 배압(back pressure)을 가하였으며 포화도를 측정하여 간극수압계수인 B값이 0.95 이상인 시료에 대해 압밀비배수 시험을 실시하였다. 가해진 전단 재하율은 0.5%/min.이다.

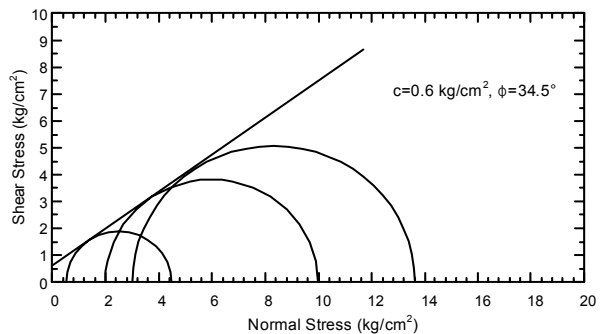
그림 8은 모래에 대한 삼축압축시험 결과인데, 먼저 구속압에 따른 응력-변형률 관계를 살펴보면, 구속압이 증가함에 따라 파괴시의 축차응력 크기도 증가하고 있으며 축차응력이 최대값에 도달한 후에는 그 크기가 일정하거나 약간의 응력연화 현상을 보이는 것으로 나

타나고 있다. 이러한 현상은 직접전단시험과 유사한 결과이며, 시험에서 얻어진 점착력과 유효마찰각은 각각 0.6kg/cm²과 34.5°로 직접전단시험 결과와 비교할 때 점착력은 조금 크고 유효마찰각은 작게 나타났다. 이처럼 점착력이 크게 나타나는 이유는 시료성형 과정에서 정적다짐으로 인해 발생하는 약간의 과압밀현상 때문으로 보이며, 직접전단시험의 경우 횡방향 변형이 구속되어 있는 K_0 압밀상태인 반면, 삼축압축시험의 경우에는 등방압밀 조건으로 시료에 가해지는 총 압밀응력이 직접전단시험에 비해 크기 때문으로 생각된다.

그림 9는 석분에 대한 삼축압축시험 결과를 도시한 것으로 구속압이 증가함에 따라 시료 파괴시의 축차응력은 증가하지만 모래와 같은 뚜렷한 최대값을 보이지 않는 응력경화 현상을 나타내고 있다. 이처럼 모래와 석분의 응력거동 양상이 다른 이유는 모래(SP)와 석분(SW)의 입도분포가 다르기 때문으로 석분의 경우 입도분포가 양호한 관계로 정적다짐에 의한 시료 성형시 큰 압력이 필요하지 않았으나 모래의 경우 입도분포가 빈 입도의 형태로 시료 제작시 석분에 비하여 더 큰 압력이 작용함으로써 전형적인 과압밀 거동을 나타내는 것으로 판단된다. 석분의 경우 전단강도정수인 점착력과 유효마찰각은 각각 1.3kg/cm², 36°로 나타났으며, 이는 모래의 경우와 마찬가지로 직접전단시험과 비교할 때 점착력은 조금 크게, 유효마찰각은 조금 작게 나타났다.

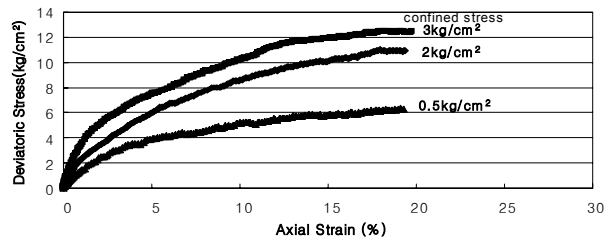


(a) 축차응력-축변형을 관계

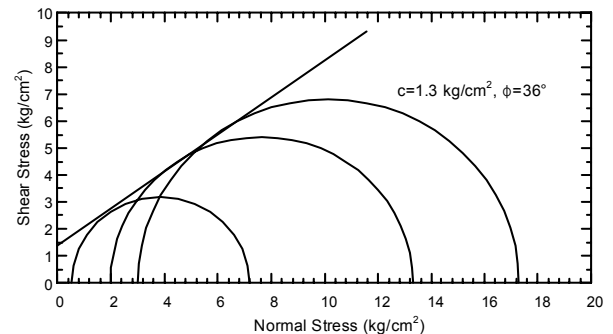


(b) 전단응력-수직응력 관계

그림 8. 모래의 삼축압축시험 결과



(a) 축차응력-축변형을 관계



(b) 전단응력-수직응력 관계

그림 9. 석분의 삼축압축시험 결과

2.3 석분의 물리적, 역학적 특성을 고려한 하수관거 기초 및 뒷채움재로서의 평가

석분에 대한 물리적, 역학적인 시험결과를 토대로 하수관거 기초 및 뒷채움재로서 모래 대신 석분의 활용가능성을 평가해 보기 위해 수행한 여러 가지 석분에 대한 공학적 시험결과들은 전반적으로 모래의 특성과 아주 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 다만 석분의 경우 공시체 제작 후 시간경과에 따른 압축강도의 증가양상은 나타나고 있으나 공시체 제작 후 6일 이후에서의 강도증가 양상은 거의 나타나지 않고 있다. 그리고 실제로 현장에서는 하수관거 하부에 석분으로 기초와 뒷채움을 했을 때 주변 지반과 다짐된 석분이 본 실험에서 가정된 경우와 같이 아주 건조한 상태의 함수비 상태로 변하지 않고 항상 습한 상태로 존재하기 때문에 마치 콘크리트와 같이 경화할 것이라는 생각은 고려하지 않아도 될 것이라 판단된다. 이러한 석분에 대한 일련의 토질시험 결과로부터 하수관거 기초 및 뒷채움재로서 모래 대신 석분을 사용한다고 해도 하수관거의 공학적 거동에는 모래보다 나쁜 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 현장 여건에 따라 하수관거의 기초로서 모래가 부족한 경우 석분을 사용하여도 하수관거의 거동에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서 수행한 시험결과를 토대로 석분의 공학적 특성을 분석한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 석분의 입도분포곡선은 모래의 경우와 비슷한 특성을 나타내지만 석분은 모래보다 입도분포가 좋기 때문에 공학적 특성은 모래보다 우수하다고 판단된다.
- (2) 석분의 다짐시험 결과, 석분의 다짐특성이 모래보다 양호하므로 하수관거 뒷채움재로 활용할 때에 다짐의 시공성 측면에서는 석분이 모래보다 유리할 것으로 판단된다.
- (3) 모래와 석분의 전단시험 결과를 살펴보면 수직응력 값의 변화에 따른 파괴시의 전단강도 값과 전단강도 정수(c , ϕ)가 서로 비슷한 값을 보이고 있다. 따라서 서로 동일한 수직응력 상태에서 비슷한 전단파괴강도를 가지고 있기 때문에 석분의 경우도 연성관의 횡방향 변형을 충분히 잘 흡수할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 모래와는 달리 석분은 공시체 제작 후 시간이 경과함에 따라 점점 강도가 증가하는 경향이 있으며, 본 연구에서 시험한 시료는 공시체 제작 후 시간이 0일, 1일, 5일까지는 시간이 경과함에 일축 압축강도가 증가하고 있으나 6일 이후부터는 거의 일정한 값에 수렴하는 양상을 보였다.
- (5) 석분과 모래에 대한 삼축압축시험을 구속압을 달리 하여 실시한 결과, 응력-변형률의 관계에서 석분의 경우는 응력경화 현상을, 모래에서는 약간의 응력 연화 현상을 나타내었으며 전단강도 정수인 점착력과 내부마찰각은 석분이 조금 큰 값으로 나타났다.

(접수일 : 2006. 6. 20 심사일 : 2006. 7. 5 심사완료일 : 2006. 9. 4)

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1996), 토목공사 표준 일반 시방서.
2. 김병탁(1993), 낙동강 유역 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 경북대학교. pp. 19~20.
3. 송준혁(2002), 이방압밀된 모래의 비배수 전단거동, 석사학위논문, 경북대학교. pp. 31~32.
4. 한국건설기술연구원(2000), 파형강관의 설계기준 및 시공지침에 관한 연구.
5. Braja, M. D.(1990), *Principles of Geotechnical Engineering-4th*, Brooks/Cole, California, USA.