

부산석회의 토질역학적 특성에 관한 연구 Geotechnical Properties of By-Product Lime

신은철¹⁾, EUN CHUL SHIN, 오영인²⁾, YOUNG IN OH, 김남돈³⁾, NAM DON KIM

¹⁾ 시립 인천대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Incheon.

²⁾ 시립인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, University of Incheon.

³⁾ 동양화학공업(주) 환경팀 차장, Manager, Environmental Division, Oriental Chemical Industries.

SYNOPSIS : Lime has been used as a chemical stabilization agent in the soft soil stabilization for highway construction project. Lime column is also utilized for deep soil improvement in the coastal area where mostly soft marine clay deposited. Recycling of discarded materials from industries is strongly suggested by the government. By-product lime used in this research is produced by the local chemical factory in Incheon. By-product lime can be categorized into three types, Precipitation Lime, Caked Lime, and Dreg. The paper presents the physical properties and mechanical properties of three types of by-product limes. Based on the presented test results, the feasibility of use these limes has been discussed.

1. 서론

서울 수도권 인구집중 현상으로 수도권 외곽에 분당 신도시, 일산 신도시, 산본, 하남시등 여러개의 대단위 아파트 주거단지가 조성되었다. 이로 말미암아 발생하는 교통체증현상을 극복하기 위하여 도심 지하철 건설공사, 신도시와 서울 간을 연결할 수 있는 전철 및 수도권 외곽 순환도로 건설공사가 현재 활발히 진행되고 있다. 또한 지방 대도시를 연결하는 고속도로 공사가 현재 여러 지방에서 시행되고 있다. 특히 21세기 동북아 시대를 맞이하여 한반도의 서해안 개발은 국가 역점사업으로 해안매립을 통한 국제신공항건설, 송도 신시가지 건설, 항만시설확장 및 항만건설등 대규모 해안매립공사가 활발히 진행되고 있다. 이 모든공사가 연약한 해성점토지반에서 이루어 지고 있어 연약지반처리가 가장중요한 문제로 대두 되고있다. 이에 부응하여 지반의 영구적인 안정처리와 값싼 연약지반 안정처리 재료 및 기술이 시급하게 요구되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 인천광역시 남구 소재 화학회사에서 발생되고 있는 연10만톤 가량의 부산석회 발생되고 있어 부산석회를 보다 효율적으로 재활용할 수 있는 연구기술 개발의 기본물성 시험결과를 제시하였다. 부산석회의 물리적 특성과 역학적특성을 바탕으로 이들 부산석회를 최대한 활용하여 최대한의 경제성을 창출할수있는 용도에 대하여 논하였다.

2. 부산석회의 종류

부산석회를 종류별로 대분해보면 탈수케이크, 침전물, 드레그(Dreg)이며 이들의 입도분포로 구분하면 탈수케이크나 침전물은 점토와 같은 미세입자로 구성되어 있고, 드레그(Dreg)는 입도분포가 큰 쇄석 또는 자갈로 구분되어진다. 이와 같은 입도분포로 부터 탈수케이크나 침전물은 도로의 연약노상토 개량, 해안 매립지역의 연약지반개량 (Deep Mixing, Lime Column, Shallow Mixing등) 사면안정등에 지반개량용 화학적 혼화제로 재활용될 수 가능성 있으며 또한 위생매립장에 복토재 및 차수재로 사용되어 각종약취 및 중금속을 흡착하여 침출수 정화에 기여할수 있다. 드레그(Dreg)는 입도분포로 보아 도로의 보조기층 및 기층, 얇은기초의 지반보강, 쇄석기둥(Stone Column)등의 건설재료로 재활용될 가능성이 매우높다. 탈수케이크, 침전물, Dreg의 재활용 타당성을 검토하기 위하여 각종 토질시험을 실시하였다.

3. 실내 토질시험

부산석회의 물리적 성질을 연구함으로써 부산석회의 입도 분포, 배수능력, 압축성, 전단강도, 지지력등을 결정할 수 있으며 이러한 토질정수는 주어진 부산석회가 각종 토목공사에 건설재료로서 적합하게 사용될 곳을 결정지워준다. 본 연구는 각종 토질 시험을 통하여 얻은 부산석회의 토질정수들을 기존의 점토들의 토질정수와 비교하여 토질 역학적 특성을 규명하여 값싼 비용으로 연약지반처리와 도로기층재로 개발하는데 그 의의가 있다. 부산석회인 침전물 석회, 탈수케이크, 드레그(Dreg)의 기본성질을 알기 위한 기초시험으로 다음과 같은 시험을 실시하였다.

- | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| - 자연 함수비 시험 (KSF 2306) | - 입도 분포시험 (KSF 2306) | - 200번체 통과 시험 (KSF 2306) |
| - 비중 시험 (KSF 2306) | - 액성한계 시험 (KSF 2306) | - 소성한계 시험 (KSF 2306) |
| - 액성한계 시험 (KSF 2306) | - 황성도 시험 (KSF 2306) | - 실내 CBR 시험 (KSF 2306) |
| - 다짐 시험 (KSF 2306) | - 점유함유율 시험 (KSF 2306) | - 일축압축 시험 (KSF 2306) |
| - 마모시험 (KSF 2508) | - 화학성분분석시험 | - 압밀시험 (KSF 2316) |

4. 실내 토질시험 결과

4.1 탈수케이크와 침전물

총 14개의 부산석회에 대한 실내토질시험을 실시하였다. 각종 토질시험에 사용된 실험 기기는 인천대학교 토목공학과 토질실험실의 실험 기기를 사용하였다. 각각의 실험결과의 신뢰도를 높이기 위하여 같은 실험을 최소한 3회이상 반복 실시하여 평균을 낸 값들이다. 부산석회의 각각의 토질정수는 표 1에 나타나 있으며 각 시료입도분포시험결과는 그림 1, 그림 3에서 보는 바와 같다. 대부분의 부산석회는 No.200체 97.47% 통과하여 실트질이 섞인 점성토 판명되며 비중은 2.04~2.15정도로 보통 점토보다 훨씬 떨어지는 값을 나타내고 있다. Atterberg 실험결과에 의하면 부산석회는 가장안정된 점토인 Kaolinite(표 1) 즉 고령토와 그 연경도가 비슷하게 나타났다. 특히 탈수케이크는 고령토중 칼슘(Ca) 성분이 있는 고령토와 액성한계, 소성한계, 소성지수가 아주 잘 일치한 것을 알 수있다. 소성지수는 침전물이 탈수케이크 보다

다소 낮은 것으로 판명되었다. 활성도(A)는 소성지수와 일치되는 결과로서 모두 비활성토로 판명되었다. Skempton(1953)에 발표한 소성지수와 점토비율간의 상관관계에 의하면 부산석회는 활성도가 0.38인 고령토보다 조금 낮은 위치에 분포되어 고령토보다 안정된 점토인 것이 입증되었다.

CBR시험 결과에 의하면 부산석회를 다짐시험결과에서 구한 최대건조밀도와 최적함수비에서 형성된 시료에 대한 CBR값을 23.3과 36.6으로 아주 양호한 건설재료로 판명되었다. 표준다짐시험에 의하면 부산석회만의 시험결과는 최대 건조밀도가 공히 1.189kg/cm^3 3이었고 이에 대응하는 최적함수비는 37.6%와 39.7%로 각각 나타났다. 다짐시험결과는 그림 2과 그림 4에서 보는 바와 같다. 부산석회의 유기질 함유량은 침전물의 경우에 11%이고 탈수케이이크인 경우에 14.3%로서 탈수케이이크가 다소 유기질 함유량이 높은 것으로 판명되었다. 표1에 나타난 각시료의 전단강도는 일축압축강도(q_u)를 비배수 포화상태의 Mohr Circle의 파괴포락선 원리에 입각하여 전단강도 (c_u)를 결정하였다. 침전물과 탈수케이이크의 최대일축압축강도는 시료의 수직변형율이 15%일 때의 수직응력을 각각 나타내며 그 결과는 표1에 나타나 있는 것과 같이 4.2t/m^2 와 5.05t/m^2 으로서 중간정도 강한 점토임이 판명되었다.

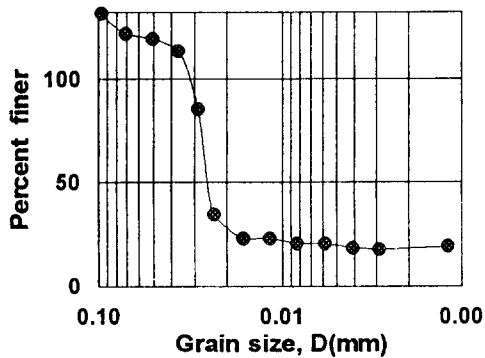


그림 1. 침전물 석회의 입도분포곡선(Hydrometer test)

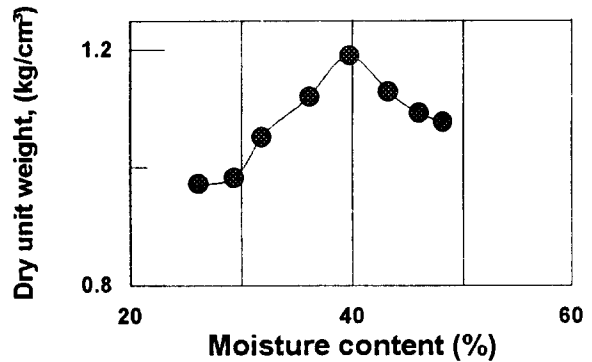


그림 2. 침전물 석회의 다짐곡선

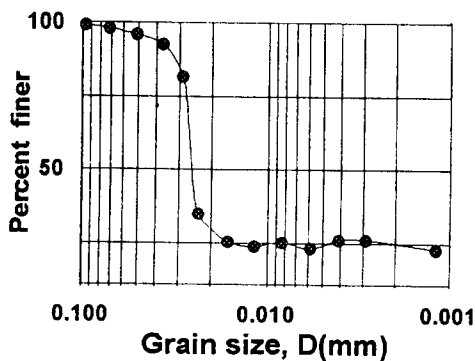


그림 3. 탈수케이이크의 입도분포곡선(Hydrometer test)

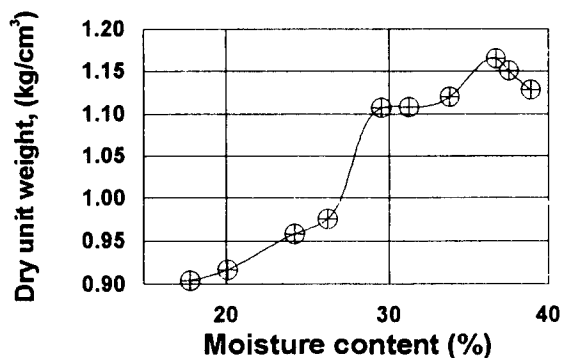


그림 4. 탈수케이이크의 다짐곡선

현재까지 진행된 각종 실내토질시험결과를 종합하여 탈수케이크와 침전물로 구분하여 표 1에 기술하였다.

표 1. 탈수케이크와 침전물의 토질정수

토질정수 시료	w_n (%)	No.200 Passing (%)	G_s	LL (%)	PL (%)	PI (%)	FI	A	CBR	$\gamma_{d(max)}$ kg/cm ³	w_{opt} (%)	C_u t/m ²	k
침전물	59	97.47	2.035	43.6	36.4	7.2	10.48	0.075	23.3	1.189	37.6	4.2	2.18×10^{-8} ~ 9.55×10^{-8}
탈수케이크	36	-	2.147	38.8	27.6	11.2	6.9	0.11	36.6	1.189	39.7	5.05	1.28×10^{-7} ~ 4.74×10^{-8}

4.2 드레그

Dreg를 재활용하여 도로 기층재 및 보조기층재로 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 연구결과를 건설부 도로포장설계 및 시공지침에 나타난 보조기층재료 및 기층재료의 기준과 비교 분석하였다. 일반적인 Dreg의 입도분포는 Dreg의 통과 중량 백분율을 건설부 도로포장 및 시공지침에 나타난 보조기층재료 및 기층재료의 통과 중량 백분율과 비교하면 입도크기 4.75mm 이상에서는 시방서에 나타난 입도크기가 다소 크고 4.75mm 이하에서는 중량 백분율이 작은 것으로 나타났으나 전체적인 입도분포를 비교해 볼 때 큰 차이를 보이지 않고 있음이 판명되었다.

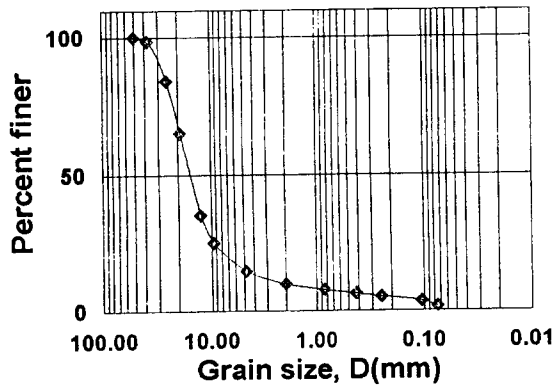


그림 5. Dreg의 입도분포곡선

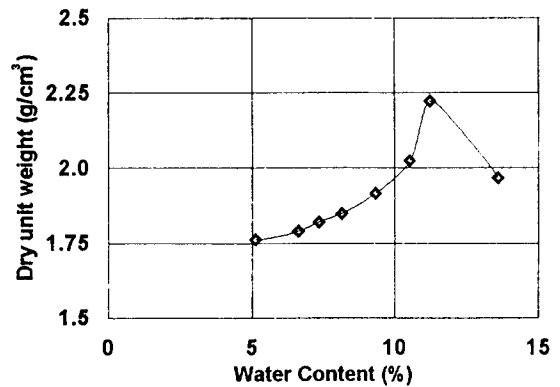


그림 6. Dreg의 다짐곡선

입도분포시험 곡선으로부터 평균균등계수(C_u)는 8.13, 곡률계수(C_c)는 3.02로 나타났다. Dreg의 입도분포시험 결과는

그림 5에서 보는 바와 같다. 골재인 경우 $C_u > 4$ 이면 균등계수가 양호하다고 판정하며 곡률계수 $1 < C_c < 3$ 이면 입도 분포가 좋은 것으로 판정한다. 따라서 Dreg는 이와 같은 기준으로 판단해 볼 때 입도분포가 매우 양호하여 다짐성이 좋을 것으로 예측된다. Dreg의 평균 자연함수비(w_n)는 8.04%이며 통일 분류법(Unified Soil Classification System)에 의하면 입도분포가 좋은 골재(GW)로 구분된다. 주어진 Dreg시료에 대해 8번의 표준다짐실험을 실시한 결과 입자크기가 비교적 굵은 골재에 관한 다짐시험결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 다짐시험결과는 그림 6에서 보는 바와 같으며 최대건조단위중량(γ_{dmax}) 과 최적함수비(w_{opt})는 각각 2.22 t/m^3 , 11.26% 로 나타났다. Dreg에 대한 비중시험은 겉보기 비중, 표면건조 포화상태의 비중, 진비중(절대 건조상태비중)을 표준시험 방법에 의거하여 실시하였다. 일반적으로 굵은 골재의 비중은 2.5~2.7이며 도로용 기층 및 보조기층으로 사용되는 부순돌의 비중은 2.5이상이다. 본 시료 Dreg의 겉보기 비중은 2.69이고 진비중(절대건조상태 비중)은 2.504이며 표면건조 포화상태의 비중은 2.57로 모두 2.5이상을 상회한다. Dreg에 대한 투수시험을 정수위 투수시험법에 의거하여 실시한 결과 19.1mm체에 잔류된 시료에 대한 평균투수계수(k)는 $1.788 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 로 도로 기층재의 투수계수로 양호한 것으로 판명되었으며 19.1mm체를 통과한 시료에 대한 투수 계수(k)는 $7.55 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 낮게 나타났다. 시료판정기준에 의하면 시료의 CBR값이 20~50일 때는 도로 기층 및 보조기층재료로서 양호하며 CBR값이 50이상일 때는 도로기층재료로서 매우좋은 것으로 판정한다. 19.1mm체 통과 시료에 대한 $CBR_{6.0}$ 의 평균값은 53.24 이며 19.1mm체 잔류 시료에 대한 CBR값은 94.91로 평가되었다. 시험한 두개의 시료가 모두 CBR값이 50이상을 나타내어 도로기층재료로 매우 좋은 것으로 판명되었다. Dreg의 화학적 성분은 CaCO_3 가 66.7%, CaO 가 14%로 총 Dreg 성분의 80.7%이며 그외의 화학적 성분은 SiO_2 , MgO , Al_2O_3 기타로 구성되어있다. Dreg가 도로 기층 및 보조기층재로 사용되었을때 골재층의 장기적인 거동을 고찰하기위하여 한국화학시험연구원(1995. 9. 30)에서 마모시험에 대한 연구가 수행되었다. Dreg에 대한 마모율시험을 B type으로 실시하였을때 마모율은 20.3%로 보조기층기준 50%이하로 나타났다. Dreg의 토질정수는 표 2에 기술되어 있다.

표 2. Dreg의 토질정수

토질특성	토질정수
자연함수비, w_n (%)	8.040
겉보기 비중, G_s	2.690
표면건조 포화상태의 비중	2.573
절대건조상태의 비중	2.504
균등계수, C_u	8.130
곡률계수, C_c	3.020
No. 200체 통과량 (%)	23.03
CBR 표준시료	53.24
19.1mm잔류시료	94.91
마모율(B급, %) (한국화학시험연구원)	20.3
최대건조단위중량, γ_{dmax} (g/cm^3)	2.220
최적함수비 w_{opt} (%)	11.26
투수계수 (cm/sec)	
19.1mm체 잔류시료	1.788×10^{-2}
19.1mm체 통과시료	7.55×10^{-4}

5. 결론

부산석회, 부산석회와 흙을 혼합하였을 때의 토질 역학적 성질을 14개의 토질실험을 통하여 고찰하여 보았다. 본 연구에서 도출한 토질특성과 기존의 알려진 일반 흙의 토질특성을 비교하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 부산석회의 주류를 이루고 있는 침전물석회와 탈수케이크석회는 연경도성분이 고령토와 비슷한 안정된 점토성 성질을 갖고 있다.
2. 부산석회의 활성도는 매우 낮으며 고령토 보다 더 낮은 것으로 판명되었으며 수축성이나 팽창성이 거의 없는 안정된 점토질 성분을 갖고 있다.
3. 다짐시험에서 구한 최대진조밀도와 최적함수비로 부산석회시료에 대한 CBR값은 23.3과 36.6으로 아주 양호한 도로기층재임이 확인되었다
4. 부산석회의 투수계수는 침전물 석회의 경우 $2.18 \times 10^{-8} \sim 9.55 \times 10^{-8}$ 이며 탈수케이크의 경우 $1.28 \times 10^{-7} \sim 4.74 \times 10^{-8}$ 으로 일반차수재 및 매립장 등의 차수재로 매우 효과적임이 판명되었다.

또한 부산석회의 일종인 Dreg는 도로 기층 및 보조기층 재료로 개발될 충분한 토질역학적 특성(표1)을 갖고 있다고 판단된다.

참고문헌

1. B. M. Das (1986). Soil Mechanics Laboratory Manual, Second Edition.
2. H. Y. Fang (1991). Foundation Engineering Handbook, pp 317~353.
3. W. N. Brabston & G. M. Hammitt II (1974). Soil Stabilization for Roads and Airfields in the Theater of Operations.
4. 사단법인 한국 지반공학회 (1995). 95년 봄 학술발표회 논문집.
5. R. W. Miller & R. L. Donahue (1990). Soils, An Introduction to Soils and Plant Growth.
6. 한국 건설기술 연구원 (1988). 연약지반 천층안정처리연구.
7. F. C Townsend (1979). Use of Lime in Levee Restoration, U.S Army Engineer Waterways Experiment Station.