

## 석회노분과 석회로 처리된 세립토의 단기적 역학특성 비교

### Comparison of Short-term Mechanical Characteristics of Fine-grained Soils Treated with Lime Kiln Dust and Lime

김 대 현<sup>1</sup> Kim, Dae-Hyeon

사 공 명<sup>2</sup> Sagong, Myung

이 용 희<sup>3</sup> Lee, Yong-Hee

#### Abstract

The Indiana Department of Transportation (INDOT) has permitted the use of Lime Kiln Dust (LKD) as a low-cost construction material in creating a workable platform for soil modification (not for soil stabilization) since the early 1990s on selected projects. However, the enhanced strength of soils with LKD has not been accounted for in the subgrade stability calculations in the design process. This study was initiated to evaluate how the lime kiln dust is a comparable material to hydrated lime. A series of laboratory tests were performed to assess the mechanical benefits of lime kiln dust in combination with various predominant fine grained soils encountered in the State of Indiana, such as A-4, A-6 and A-7-6. In the course of this study, several tests such as the Atterberg limits, standard Proctor, unconfined compression, CBR, volume stability, and resilient modulus were performed. As a result, mixtures of fine grained soils with 5% lime or 5% LKD substantially improve unconfined compressive strength up to 60% - 400%. CBR values for treated soils are in the range of 25 to 70 while those for untreated soils range from 3 to 18. In general, significant increase in resilient moduli of the soils treated with lime and LKD was observed. This indicates that lime kiln dust may be a viable, cost effective alternative to hydrated lime in enhancing the strength of fine grained soils.

#### 요 지

인디애나주 도로국 (INDOT, Indiana Department of Transportation)에서는 부분적으로 1990년대 초반부터 토사개량 (지반 안정화는 아님)에 대한 저비용의 건설재료로서 석회노분을 사용해왔다. 그러나 석회노분을 포함한 흙의 강도향상은 설계과정에서 노상의 안정화계산에 반영되지 않았다. 따라서 본 연구는 석회노분이 수화된 석회와 유사한 공학적 성질을 지닌 재료인지를 평가하기 위하여 수행되었으며, 인디애나주에서 흔히 접할수 있는 A-4, A-6, A-7-6와 같이 세립분이 우세한 다양한 흙과 조합하여 석회노분의 역학적 장점들을 평가하기 위해 일련의 실내실험들을 수행하였다. 본 연구에서는 아터버그한계, 표준다짐, 일축압축, CBR, 체적 안정성과 회복탄성계수등의 실험들을 수행하였으며 그 결과 비처리토에 비해 처리토의 경우 60-400% 정도의 범위로 일축압축강도가 증가하였다. 비혼합토에 대한 CBR 값의 범위가 3-18인 것에 반하여, 혼합토에 대한 CBR 값들은 25-70의 범위내에 있다. 또한, 일반적으로 혼합토의 회복탄성계수도 상당히 증가하는것으로 관찰되었다. 이상의 결과는 석회노분은 수화된 석회에 대한 대안으로서 실용적이고 경제적인 재료이며 세립토의 강도를 향상시키며 작업성을 향상시킬 수 있음을 암시한다.

**Keywords :** Fine grained soils, Lime, Lime kiln dust, Resilience modulus, Stability, Subgrade

1 정회원, 미국 인디애나주 도로국 연구소 지반공학연구원 (Member, Geotechnical Researcher, Research Division, Indiana Dept. of Transportation, dkim@indot.state.in.us)

2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Associate researcher, Track & Civil Engrg. Research Dept., Korean Railroad Research Institute)

3 정회원, 한국도로공사 지반공학연구원 (Member, Geotechnical Researcher, Korea Highway Corporation)

## 1. 서론

연약한 원지반 상태에서 지반강도가 특정한 시방규정에서 요구하는 강도특성을 만족시키지 못할 경우 요구되는 공학적 특성을 향상시키기 위하여 사용하는 지반개량 방법중의 하나로서 강성이 높은 인공재료들과 흙을 혼합하는 방법이 있다(Hausmann, 1990). 지난 수십년 동안 미국에서는 석회를 이용하여 도로 노반의 강성을 높이는 방법을 사용하여 왔으며, 이러한 처리방법을 통하여 기층의 두께감소와 연약한 노상의 지지력을 증가시킬 수가 있었다(Bergado, 1996; Croney와 Croney, 1997; Hausmann, 1990). 포장구조의 특성상 노상이 연약할 경우 불가피하게 기층의 두께는 두꺼워지므로 비경제적인 상황이 된다. 따라서 노상의 강성보강은 경제적인 측면뿐만 아니라 원활한 시공을 위해서도 반드시 수행되어야 한다.

화학적인 방법을 통한 지반개량공법은 현장에서 지반의 안정화에 대한 가능성과 경제성 그리고 최소한의 붕괴가능성을 보장 할 수 있는 대안으로 인식되어 왔다. 석회, 시멘트, 플라이 애쉬와 같은 화학적 재료들은 높은 함수비와 낮은 강도로 인하여 노상의 건설에 즉시 사용하기에 어려운 흙을 어느 정도 안정화(포장 설계에 있어서 증가된 강도) 또는 개량(다짐할 수 있는 작업성) 하는데 사용되었다(INDOT, 2002). 국내에서도 석회나 석고 등의 산업부산물을 지반공학적인 측면에서의 적용을 위하여 여러 방향으로의 연구가 진행되어 왔다(신과 오, 1999; 천과 고, 1999; 이 등, 2001; 임, 2001).

인디애나 도로국에서 노상건설을 촉진하는데 있어 생석회(CaO) 또는 수화석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 통상적으로 사용하고 있다. 석회와 함께 처리된 흙은 향상된 소성, 작업성 그리고 체적변화특성을 보인다. 석회는 세립토(AASHOTO 분류상 A-4, A-6 그리고 A-7), 특히 점성토의 처리에 주로 사용되는데, 흙-석회 혼합토의 단기반응은 물과 점토광물에 의한 수화반응과 응집(이온교환)을 야기하며, 장기반응은 고결화(cementation)와 관련이 된다. 생석회는 흙 속에서 물과 매우 빨리 반응하는데, 이때 발생하는 건조반응은 특히 습윤한 점토의 처리에 유리하다. 석회가 점토와 혼합될 때, 점토광물 표면에 흡착된 나트륨과 다른 양이온들은 갈슘과 교환되며, 점토광물의 이러한 양이온 교환은 점토광물의 구조적인 요소들간 서로 연결되는 방법에 영향을 준다. 점토의 소성도가 감소되면, 작업성의 향상과 강성 및 강도는 증가하

게 된다. 고결화는 안정화된 흙의 강도에 중요한 요소이며, 흙의 비표면적이 커질수록 석회와 점토광물의 반응이 활발해지므로 고결화 과정이 더욱 효과적이다; 이러한 이유로 인해 석회는 깨끗한 모래와 자갈을 개량하는데에는 적합하지 않다는 점을 주의해야 한다. 실용적인 석회의 혼합비 범위는 사용되는 흙 중량의 약 2-8%이다. 이와같이 석회는 점토 노상 안정에 있어 강도의 향상과 수축, 팽창의 감소에 큰 역할을 한다.

석회노분(Lime Kiln Dust, LKD)은 석회와는 달리 시공실적이 거의 없기 때문에 노상의 안정화 재료로서는 검증이 되지 않은 상태이므로 석회노분과 혼합한 흙의 증가된 강도는 설계에 고려하지 않고 안정화되기 이전 원지반 지반정수가 보수적으로 설계에 사용된다. 따라서, 본 연구에서는 지반의 개량과 안정화에 사용된 석회노분의 역학적인 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 석회노분 및 석회와 혼합된 흙의 공학적 특성

석회노분은 석회의 제조과정에서 건조로에서 발생하는 분진을 수집시스템에서 차집한 부산물이다. 석회노분은 주로 산화칼슘으로 구성되어 있지만 황칼슘(연료의 유황함유량에 따라 다름), 플라이애쉬, 석회석 등의 다양한 성분이 함유되어 있다(Francis 2003). 석회는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 분리하기 위하여 석회석(CaCO<sub>3</sub>)을 고온(약 1090℃)으로 가열시켜서 생산된다.

석회에 관해서는 많은 연구가 수행되었지만 석회노분의 역학적인 평가는 극히 제한적으로 수행되었다(Parsons, 1995; Ciesielski, 1995; Henkel, 1997). 따라서, 석회노분에 대하여 이용할 수 있는 데이터가 극히 제한되어 있기 때문에, 석회혼합토의 특성에 대한 이해를 바탕으로 석회노분의 특성을 간접적으로 이해하였다. 석회혼합토의 거동은 주로 흙의 타입, 석회 함유량, 온도, 양생시간에 의존한다(TRB, 1987).

석회혼합토의 함수비-밀도 관계는 혼합토의 양생에 따라 끊임없이 변화한다. Heckel(1997)에 의하면 석회혼합토에서 흔히 볼 수 있는 것 처럼 석회노분 혼합토에서도 비혼합토에 비해 다짐곡선에서 최대건조단위중량이 감소하고 최적함수비가 증가한다. 이러한 밀도의 감소는 다짐불량 때문이라기보다는 고결화로 인한 혼합토의 구조적특성이 변화하기 때문이다.

비록 양생되지 않은 석회혼합토(혼합직후)도 일축압축강도, CBR, 소성지수가 상당히 향상되는것이 관측



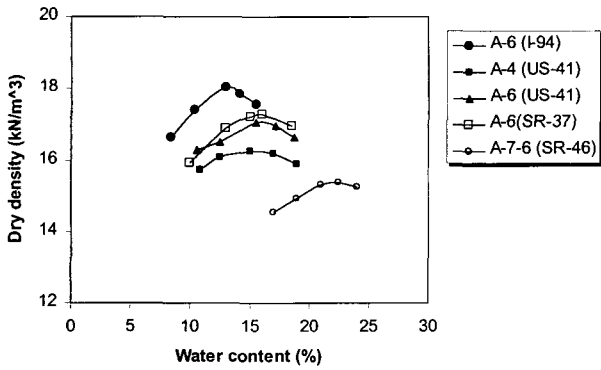


그림 3. 사용한 흙들의 다짐곡선

본 연구에서는 각각의 3가지 시료(비혼합, 5% 석회 혼합, 그리고 5% 석회노분 혼합)를 준비하였으며, 각각의 시료에 대하여 90%(건조축 다짐), 95% 그리고 100% 다짐시의 일축압축강도, CBR, 팽창성(swell potential) 그리고 회복탄성계수(resilient modulus)를 평가하였다. 앞서 언급한 바와 같이 건조밀도와 함수비는 양생시간에 따라 변화하지만, 본 연구에서의 주된 관심사항은 양생효과를 평가하는 것보다는 석회노분-흙 혼합토와 석회-흙 혼합토의 공학적 특성을 정성적으로 비교하는 것이므로, 본 연구에서는 시간에 따른 양생효과는 고려대상에서 제외하였다. 모든 시험들은 흙과 석회 또는 석회노분을 혼합한 후 2시간 후에 수행하였다.

#### 4. 실험결과에 대한 고찰

##### 4.1 일축압축강도

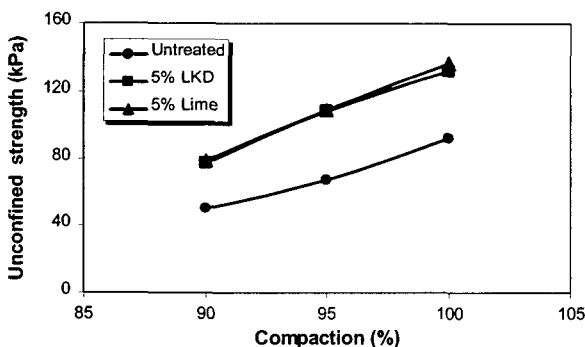
일축압축강도는 인디애나 도로국에서 노상의 역학적 특성을 평가하는데 중요한 요소이다(Zia와 Fox 2000). 일축압축시험은 5%의 석회노분과 5%의 석회를 각각 흙과

혼합하여 혼합한 흙의 강도 증가량을 평가하기 위하여 수행하였다. 그림 4(a)와 (b)는 A-4(US-41), A-6(SR-37)에 대하여 석회노분과 석회로 처리된 흙에 대한 일축압축강도를 나타내는 그림이다. 그림에서 나타나듯이, 일축압축강도는 5%의 석회노분과 5%의 석회가 혼합된 흙에 대하여 상당히 증가함을 알 수 있다. A-4(US-41)과 A-6(SR-37)에서, 5%의 석회노분과 5%의 석회혼합토에 대하여 일축압축강도는 거의 동일한 증가를 나타내고 있으며, 비처리토에 비해 60-400% 정도의 범위로 일축압축강도가 증가하는 것을 알수있다. 그림 4는 다짐도가 증가할수록 일축압축강도 또한 증가하는 양상을 보이고 있는데 이는 재료의 종류에 관계없이 노상 다짐의 중요성을 나타내고 있다.

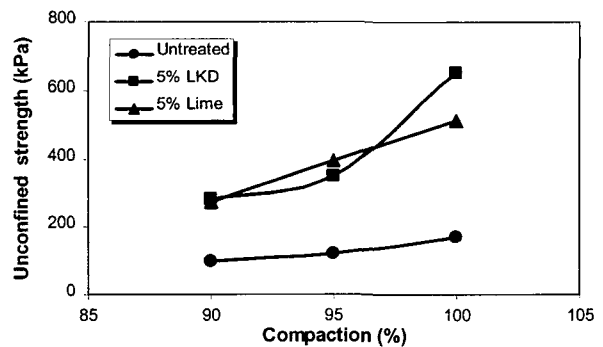
##### 4.2 CBR 및 팽창성

노상재료의 특성을 평가하기 위하여 회복탄성계수의 사용이 이미 널리 권장되었지만 회복탄성계수값이 제한적으로 이용되고 있어 실무에서는 CBR 값이 여전히 사용되고 있다. 표 2는 비혼합토와 석회 및 석회노분 혼합토에 대한 CBR 값과 4일간 수침 후 측정된 팽창량을 나타낸다. 표 2에서 나타난 바와 같이, 석회 및 석회노분 혼합토가 비혼합토 보다 최대건조밀도는 작아지고, 최적함수비는 크게 나타난다. CBR값에 있어서는 5% 석회혼합토 및 5% 석회노분혼합토의 CBR값이 비혼합토와 비교하여 훨씬 더 크게 나타난다. A-7-6(SR-37)을 제외하고 CBR 값중 가장 큰 값은 5% 석회노분 혼합토에서 얻어졌다. 비혼합토에 대한 CBR 값의 범위가 3-18인 것에 반하여, 혼합토에 대한 CBR 값들은 25-70의 범위 내에 있다.

팽창성은 다짐도에 따라 변화하는데 함수비가 적고



(a)



(b)

그림 4. (a) A-4(US-41)와 (b) A-6(SR-37)에 대한 일축압축강도 vs. % 다짐도

표 2. 비혼합토와 5% 석회노분과 5% 석회로 처리된 CBR과 팽창성(최적함수비로 다짐)

사용된 흙	혼합여부	최대건조밀도(kN/m³)	최적함수비(%)	조제밀도(kN/m³)	조제함수비(%)	건조밀도(%)	팽창량	CBR
A-6 (I-94)	비혼합토	18.1	13	18.0	13.5	99.5	0.22	3.1
	5% 석회	17.3	17	17.1	17	98.8	0.17	45.3
	5% 석회노분	17.3	17	17.6	16	102.1	0.19	68.7
A-4 (US-41)	비혼합토	16.3	15	16.4	14.8	100.3	0.07	17.3
	5% 석회	16.3	17	16.5	16.9	101.3	0.04	32.3
	5% 석회노분	16.2	17	16.2	17.5	100.1	0.26	52.4
A-6 (US-41)	비혼합토	17.1	16	17.1	16.8	99.9	0.33	11.3
	5% 석회	16.5	19	16.0	19.5	97.2	0.04	39.1
	5% 석회노분	16.3	18	16.8	18.6	102.6	0.22	64.5
A-6 (SR-37)	비혼합토	17.3	16	17.4	16.1	100.6	1.77	5.9
	5% 석회	17.7	18	17.4	18.2	98.1	0.17	63.1
	5% 석회노분	17.4	13	17.4	12.5	99.9	0.68	68
A-7-6 (SR-46)	비혼합토	15.4	23	15.6	23	101.5	3.53	2.8
	5% 석회	15.2	27	14.8	27.6	97.1	0.79	44
	5% 석회노분	15.1	25	14.8	26	98.0	1.72	25.3

다짐도가 낮을수록, 흙속에 갇힌 공기의 비율이 높아지므로 팽창량이 더 많아진다. 이러한 이유로, 100% 다짐도와 비교하여 90%와 95% 다짐도에서 팽창량이 많은 것으로 판단되었다. 5% 석회와 5% 석회노분의 혼합이 팽창성을 현저하게 감소시키는 것으로 보인다. 표 2에서 보는 바와 같이, 5% 석회 혼합토는 5% 석회노분 혼합토보다 팽창성 감소에 있어서 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 석회노분 혼합토는 비혼합토와 비교하면 팽창성에 있어서 일정한 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 높은 점토함유량을 가진 흙을 5% 석회노분과 혼합하였을 때 일정량의 팽창성을 감소시킬수 있는 것을 의미한다. A-4(US-41) 시료에 대해서는 흥미롭게도 석회노분 혼합토의 팽창성은 약간 증가하였다. 이는 표 1에 나타낸 바와 같이 A-4(US-41) 시료가 상당히 높은 실트함유량을 가지기 있으므로 혼합되는 실트자재의 팽창성이 낮은것에 기인한 것으로 판단된다.

### 4.3 흙-석회노분과 흙-석회 혼합토의 회복탄성거동

1986년 이래로 AASHTO 설계법에서는 고속도로 건설공사시 포장의 설계에서 회복탄성계수의 사용을 권장하고 있으며, 회복탄성계수는 노상의 특성을 평가하는데 이용되고 있다. 회복탄성계수시험은 AASHTO T-307에 따라 응력단계에 따라 수행되었다. 회복탄성계수시험에서 14, 28, 41kPa의 구속응력을 적용하였으며, 각각의 구속응력에 대하여 14, 28, 41, 55, 69kPa의 축차응력을 가하였다. 회복탄성계수시험에 사용한 시료들은 시험 전 혼합함수비를 유지하기 위하여 다른 시험과 마찬가지로

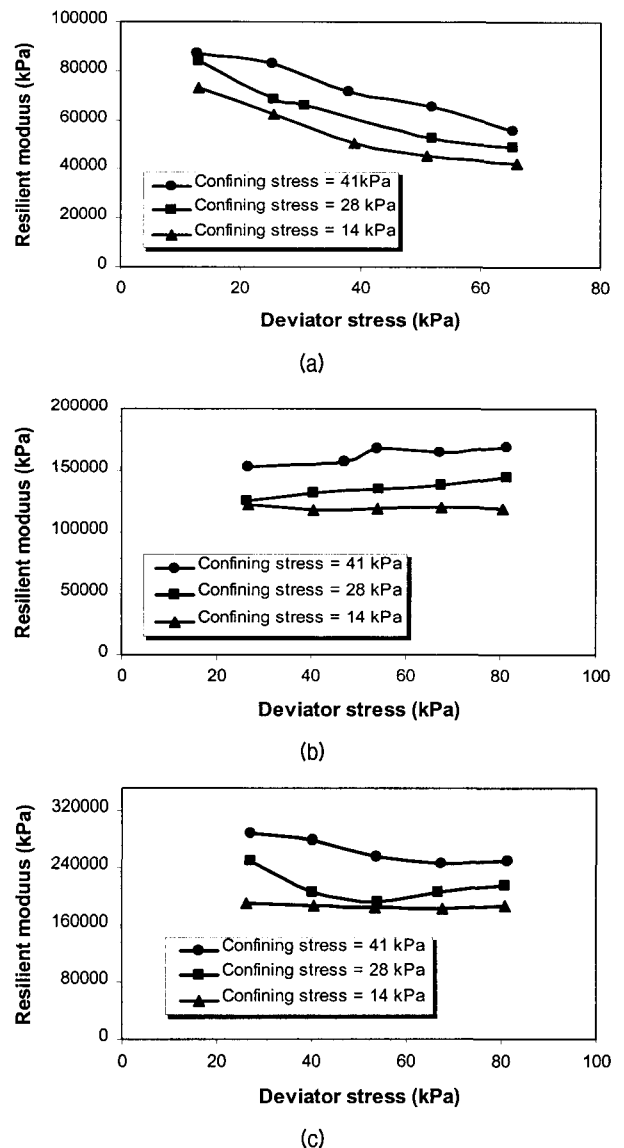


그림 5. A-6(SR-37)에 대한 (a) 비혼합토 (b) 5% 석회노분 혼합토와 (c) 5% 석회 혼합토의 회복탄성계수 vs. 축차응력

지로 비닐백으로 2시간 동안 밀봉하여 보관한 후에 사용하였다. 일반적으로 세립토에 대한 회복탄성거동은 주로 구속압에 의존한다. 예를 들면, 구속압이 높을수록 회복탄성계수는 높아진다(Lee 등, 1997; Thompson, 1979; Elliot과 Thornton, 1988; Santa, 1994). 반대로 축차응력이 증가할수록, 회복탄성계수는 강성의 감소로 인해 작아진다.

그림 5(a), (b), (c)는 구속응력 14, 28, 41kPa에서 A-6(SR-37)에 대한 회복탄성계수와 축차응력의 관계를 나타낸 그림이다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 구속응력이 높아질수록 회복탄성계수 값이 높아짐을 분명하게 알 수 있는데, 이는 마찰거동을 보이는 흙들의 전형적인 거동형태이다. 축차응력에 대해서는, 비혼합토에서는 회복탄성계수 값이 축차응력이 증가함에 따라 감소하지만, 5% 석회노분 혼합토와 5% 석회 혼합토는 회복탄성계수값에서 축차응력의 영향이 불분명하게 나타난다. 그러한 거동은 전형적인 조립토의 거동과 유사한 것으로 보이며 이는 혼합토 강성의 증가로 인한 것으로 판단된다.

일반적으로 노상을 설계함에 있어서 18kips의 등가단일축 (Equivalent Single Axle Load, ESAL) 하중에 의해 노상표면에서 유발되는 응력수준(통상적으로 14-69kPa 정도이다)에 해당되는 회복탄성계수값이 설계변수로 사용된다. 본 연구에서는 Burmister의 해를 근간으로 하는 범용프로그램인 ELSYM5를 이용한 다층토 탄성해석 결과로부터 인디애나 도로국에서 관리하는 도로에서 발생하는 최소한의 구속압력, 14kPa를 적용하였다. 그림 6(a)와 (b)는 14kPa의 구속응력의 조건으로부터 회복탄성계수와 축차응력의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 14kPa의 구속응력에 해당하는 회복탄성계수값을 사용하는 것은 안전측의 설계를 위함이다. 그림에서도 알 수 있듯이, 5% 석회 혼합토는 5% 석회노분 혼합토보다 더 큰 회복탄성계수값을 보인다. 5% 석회노분 혼합토는 앞에서 언급했듯이 CBR값에 있어서는 석회혼합토와 유사한 값들을 보였지만, 회복탄성계수 값에 있어서는 5% 석회 혼합토보다 다소 적은 회복탄성계수 값을 보인다. 그러나 그림 7(a)와 (b)에 나타난 것처럼, A-4(US-41)과 A-6(US-41)에 대한 회복탄성계수 값은

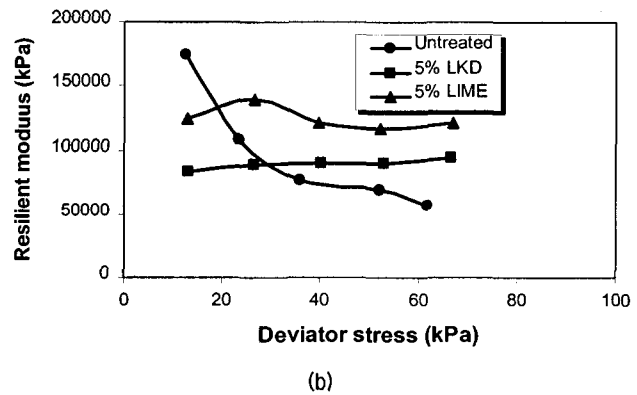
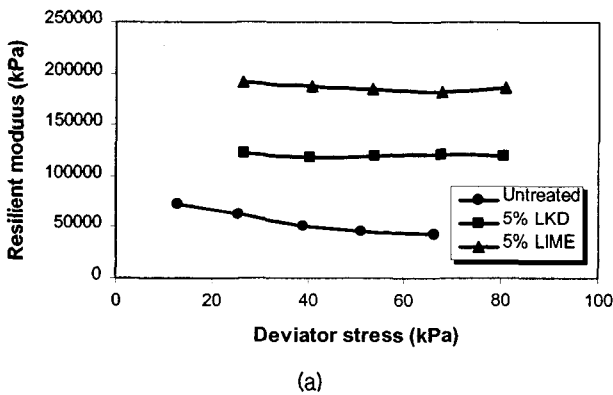


그림 6. (a) A-6(SR-37)와 (b) A-7-6(SR-46)에 대한 구속압 14kPa에서의 회복탄성계수 vs. 축차응력

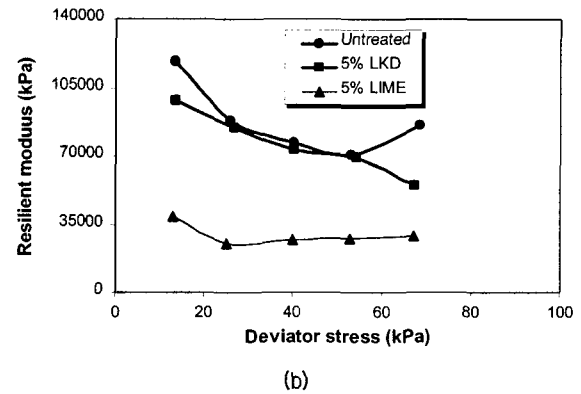
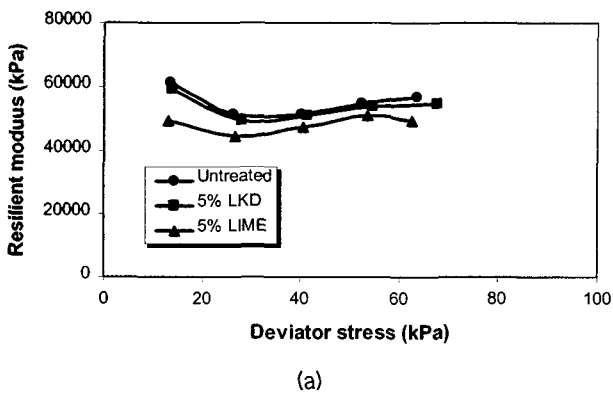


그림 7. (a) A-4(US-41)와 (b) A-6(US-41)에 대한 구속압 14kPa에서의 회복탄성계수 vs. 축차응력

석회와 석회노분 혼합토에서 비혼합토에 비해 증가 정도가 미미하다. 이러한 현상은 실트성 토질에서는 점토질의 함량이 작기 때문에 석회 혹은 석회노분과의 응집

및 고결화가 충분하게 발생하지 못하여 동하중에 의해 입자간의 결합이 쉽게 이완되는 것으로 보인다. 따라서 적은 점토함유량을 가지는 혼합토에 대한 회복탄성계수 값의 사용은 주의를 요한다. 그러나 본 연구에서는 양생효과는 고려하지 않았으므로 혼합토에 대한 회복탄성계수 값들은 시간을 가지고 양생이 된다면 상당히 증가할 것으로 예상된다.

일반적으로 노상토의 회복탄성거동은 구속응력과 축차응력을 고려한 일반적인 모델로 알려진 Uzan model (Uzan, 1985)에 의해 설명된다. 그림 8(a)와 (b)는 본 연구에서 실측 회복탄성계수값과 5% 석회노분 혼합토와 5% 석회 혼합토의 예측 회복탄성계수값과의 관계를 나타낸 그림이다. 예측치와 실측치에 비교에서는 본 연구에 사용된 다섯개의 흙들에 대한 회복탄성계수값들이 사용되었다. 표 3은 비혼합토와 혼합토에 대한 회귀분석 계수를 보여준다. 예측 회복탄성계수값은 아래의 식으로부터 구하였다.

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} \quad (1)$$

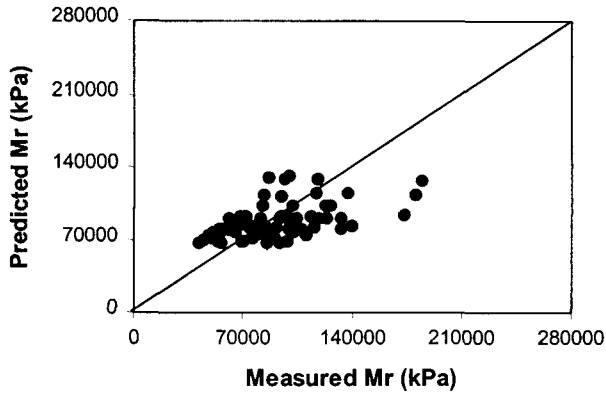
여기서,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 회귀분석 계수,  $\theta$ 는 주응력의 합,  $p_a$ 는 표준압력,  $\sigma_d$ 는 표준압력과 같은 단위의 축차응력을 의미한다.

예측 및 실측된 회복탄성계수 값은 비혼합토와 석회노분 혼합토에 대해서는 어느정도 상관성을 나타내고 있으나, 석회 혼합토에 대해서는 그렇게 좋은 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 서로 다른 성질을 지닌 흙들에 대하여 하나의 선형회귀식으로 표현하기에는 다소 무리가 있음을 암시한다.

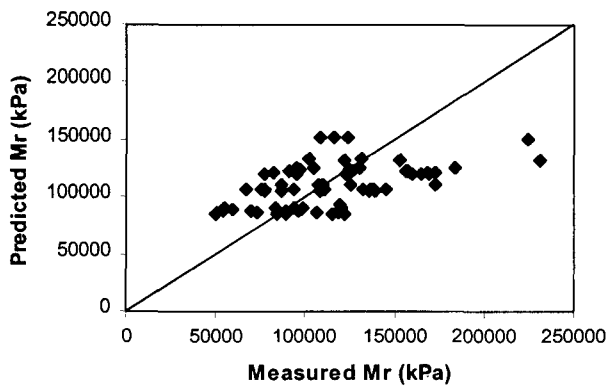
## 5. 결론

노상의 개량과 안정화를 위해 사용될 수 있는 석회노분의 공학적 특성을 평가하기 위하여 실내시험을 실시하였다. 인디애나 각지에서 채집한 세립토에 5% 석회노분과 5% 석회를 혼합하였다. 일축압축강도, CBR, 회복탄성계수 시험을 비혼합토, 5% 석회노분 혼합토 그리고 5% 석회 혼합토의 90%, 95%, 100% 다짐도 시료에 대하여 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

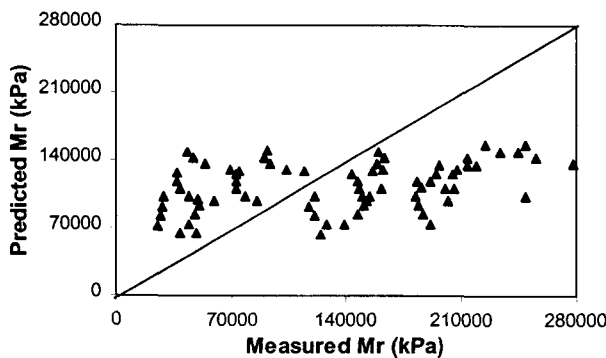
- (1) 5% 석회 또는 5% 석회노분을 세립토에 첨가시킨 혼합토는 일축압축강도가 약 60-400%까지 향상되



(a)



(b)



(c)

그림 8. (a) 비혼합토 (b) 5% 석회노분과 (c) 5% 석회 혼합된 흙들의 실측치 회복탄성계수 vs. 예측치 회복탄성계수

표 3. 비혼합토, 5% 석회노분 혼합토, 5% 석회 혼합토의 회귀분석 계수

	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
비혼합토	575.4	0.39	-0.402	0.30
5% 석회노분 혼합토	827.9	0.67	-0.317	0.28
5% 석회 혼합토	1020.9	0.81	-0.135	0.11

있으며, 혼합토와 비혼합토 모두 다짐도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하였다. 이는 재료와 상관없이 노상 다짐의 중요성을 나타내는 지표이다.

- (2) 석회노분과 석회 혼합토는 CBR값이 현저하게 증가하였고 팽창성은 일반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 5% 석회 혼합토보다는 5% 석회노분 혼합토가 더 큰 CBR값을 나타냈다. 그러므로 노상개량에 석회노분을 사용하더라도 석회처럼 결과가 좋을 것으로 사료된다.
- (3) 석회노분과 석회 혼합토의 회복탄성계수의 거동은 구속응력이 커짐에 따라 회복탄성계수가 증가한다. 그러나 비혼합토와는 달리, 혼합토의 회복탄성계수에 대한 축차응력의 영향은 혼합토 강성의 증가로 인해 미미하게 나타났다.
- (4) 석회노분 혼합토와 석회 혼합토의 CBR값이 비혼합토보다 더 크게 나타났지만, A-4(US-41)과 A-6(US-41) 혼합토의 회복탄성계수는 비혼합토보다 작게 나타났다. 이들 두 혼합토에서 회복탄성계수가 작게 나타나는 이유는, 비혼합토의 점토함유량이 작고, CBR 시험과 회복탄성계수 시험(동적반복시험)들의 메카니즘이 기본적으로 다르기 때문인 것으로 사료된다. 그러므로 석회노분 또는 석회와 혼합하여 사용할 때에는 A-6(SR-37)과 A-7-6(SR-46)처럼 이미 효과가 입증된 높은 점토함유량을 가진 흙에 적용하는 것이 바람직하다. 석회노분과 석회 혼합토에 대해서는 추가적인 회복탄성계수 시험이 다양한 CBR 시험과 연계되어 반발거동에 있어서 충분한 결론을 도출해 낼 수 있도록 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (5) 사용된 모든 흙들에 대해 회복탄성계수 계수를 추정하기 위해 Uzan model을 사용하여 비혼합토, 5% 석회노분 그리고 5% 석회 혼합토에 대한 회귀분석을 수행하였다. 예측된 회복탄성계수값들은 실측된 회복탄성계수 값들과 상관성이 잘 나타나지 않았다. 다른 흙들을 하나의 수식으로 표현하기에는 다소 무리가 따른것으로 보인다.

인디애나주에서 석회노분은 시공실적에 있어서 제한된 데이터 때문에 노상 안정화가 아닌 지반개량에 사용되어 왔으나, 지반개량에 의해 얻어지는 일축압축강도, CBR, 회복탄성계수값들의 증가는 설계에 반영되지 않았다. 비혼합토, 5% 석회노분 혼합토와 5% 석회 혼합토

에 대한 일축압축강도, CBR, 회복탄성계수 시험들의 결과는 석회의 대안으로서 석회노분이 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다. 다만, 회복탄성거동에 대한 보다 현실적인 설계를 위해 석회노분과 석회 혼합토의 회복탄성계수 값들을 축적할 수 있도록 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

## 참 고 문 헌

1. 신은철, 오영인 (1999), 폐석회를 활용한 성토매립지반의 지지력 및 침하특성에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제15권 4호, pp.175-184.
2. 천병식, 고갑수 (1999), 생석회과일에 의한 주변지반의 압밀효과 분석에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제 15권 5호, pp.281-290.
3. 이용수, 정형식, 정하익 (2001), 성토재료로서 인산석고의 공학적·환경적 특성, 한국지반공학회논문집, 제17권 4호, pp.331-339.
4. 임종석 (2001), 생석회말뚝 타설면적비의 변화에 따른 연약점토 지반의 개량효과, 한국지반공학회논문집, 제17권 5호, pp.37-42.
5. Bergado D. T., Anderson, L. R., Miura, N. and Balasubramaniam, A. S. (1996), "Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments", ASCE, New York, pp.89-101.
6. Ciesielski, S. K. and Collins, R. J. (1995), "Kiln-Dust-Antistripping additives for Asphaltic Concrete Mixtures", Report, Newfoundland Department of Works, Services and Transportation, Materials Engineering Division, pp.5-11.
7. Croney, D. and Croney, D. (1997), "Design and Performance of Road Pavements", 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Publishing Company, pp.121-130.
8. Elliot, R. P., and Thornton, S. I. (1988), "Simplification of Subgrade Resilient Modulus Testing". Transportation Research Record, 1192, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-7.
9. Francis, H. (2003), "Definitions of Common Lime Terminology". [http://www.imecementgypsum.com/papers\\_scheda.asp?ID=7](http://www.imecementgypsum.com/papers_scheda.asp?ID=7), Accessed July 10, 2003.
10. Hausmann, M. R. (1990), "Engineering Principles of Ground Modification", McGraw-Hill Publishing Company, pp.132-140.
11. Henkel, G. (1997), "Alternative Materials for the Modification and stabilization of Unstable Subgrade soils". Physical Research report No.125, Illinois Department of Transportation, Springfield, pp.7-15.
12. INDOT. (2002), "Design Procedure for Soil Modification". Geotechnical Section, Materials and Tests Division, Indiana, pp 1-10.
13. Lee, W., Altschaeffl, A. G. and White, T. D. (1997), "Resilient Modulus of Cohesive Soils". *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, 123(2), pp.131-136.
14. Parsons, T. (1995), "Kiln-Dust-Antistripping additives for Asphaltic Concrete Mixtures". Report, Newfoundland Department of Works, Services and Transportation, Materials Engineering Division, pp. 77-85.
15. Santa, B. L. (1994), "Resilient Modulus of Subgrade Soils: Comparison of Two Constitutive Equations". Transportation Research Record, 1462, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.79-90.
16. Thompson, M. R. (1966), "Lime Reactivity of Illinois Soils".



- Journal of the Soils and Foundations Div.*, ASCE, Vol.92, No.SM5, pp.67-92.
17. Thompson, M. R. (1969), "Engineering Properties of Lime-Soil Mixtures. *Journal of Materials*", ASTM, Vol.4, No.4, pp.38-52.
  18. Thompson, M. R., and Robnett, Q. L. (1979), "Resilient Properties of Subgrade Soils". *Proceedings of ASCE*, 105(TE1), pp.71-89.
  19. Transportation Research Board. (1987), "Lime Stabilization. State of the Art Report 5", Washington, D. C., pp.5-15.
  20. Uzan, J. (1985), "Characterization of granular material". *Transportation Research Record*, 1022, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.52-59.
  21. Zia, N. and Fox, P. (2000), "Engineering Properties of Loess-Fly Ash Mixture for Roadbase Construction". *Transportation Research Record*, 1714, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.49-56.

(접수일자 2003. 10. 6, 심사완료일 2004. 4. 10)