

# 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석

## Analysis of Compressive Strength of Lightweight Air-mixed Soil According to the Properties of Soil

송 준 호<sup>1</sup> Song, Jun-Ho  
임 종 철<sup>2</sup> Im, Jong-Chul  
홍 석 우<sup>3</sup> Hong, Seok-Woo

### Abstract

To investigate the relationship between compressive strength ( $q_u$ ) of Lightweight Air-mixed soil (LAS) and its physical deformation coefficient ( $E_{50}$ ), a series of unconfined compressive tests have been performed on specimens of LAS according to various dredged soil types by percentage of sand, silt and clay. From the results it was found that the cement content ( $C_i$ ) and unit weight ( $\gamma_m$ ) are most influence factors on strength, and percentage of sand, silt, clay by grain size analysis (KS F2302) have more effect on compressive strength than other physical properties of soil. It was also found that the rate of strength ( $a$ ) increases with curing time, but it reduces with the increase of percentage of clay ( $C_{\%}$ ).

### 요 지

경량기포혼합토(LAS)의 일축압축강도( $q_u$ )와 변형계수( $E_{50}$ )에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 모래, 실트, 점토의 함유율이 서로 다른 건설발생토(원료토)를 이용하여 일축압축강도시험을 수행하였다. 일축압축강도시험 분석결과 동일 원료토에서 LAS의 목표단위중량( $\gamma_m$ ) 및 시멘트 첨가량( $C_i$ )이 강도-변형특성의 지배인자로 분석되었으며, 서로 다른 원료토에서는 단위중량과 시멘트 첨가량이 동일할 경우 원료토의 입도분석시험(KS F2302)결과 산출된 모래, 실트, 점토의 상호비율과 강도-변형특성의 관계를 제시하였다. 양생일에 따른 LAS의 강도발현속도는 원료토내 점토의 함유율( $C_{\%}$ )이 증가할수록 강도발현율( $a$ )은 저하되는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Compressive strength, Lightweight Air- mixed Soil (LAS), Material separation, Silty sand, Soft soil

### 1. 서 론

경량기포혼합토(LAS)는 원료토에 물과 시멘트와 같은 고화제를 혼합하여 유동화시킨 것에 기포를 혼합하여 경량화를 이룬 것으로, 연약지반 위의 성토, 옹벽의 뒤채움, 구조물의 되메우기 등에 효과적인 재료이다(그

림 1 참조). 밀도는  $6 \sim 12 kN/m^3$ 로 제작가능하며, 혼합물은 제작 직후에는 유동성을 나타내나 고화제의 반응이 진행됨에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 된다. 일축압축강도는  $1,000 kN/m^2$  정도로 제작 가능하며, 보통의 토사에 비해 가벼우며 지반 등에 미치는 하중을

1 부산대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ.)

2 정희원, 부산대학교 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., imjc@pusan.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, 동의대학교 토목공학과 겸임교수 (Member, Adjunct Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongeui Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

경감할 수 있다(그림 2 참조). 또한, 유동성이 높으므로 펌프 압송에 의한 타설시공을 행할 수 있으며 전압이 필요 없으므로 시공이 용이하다. 더욱이 진흙 등의 저품질 토, 건설발생토, 오니 등을 이용할 수 있어 자원 활용 면에서 큰 장점을 가지고 있다(경량기포혼합토 기술자료집). 이러한 LAS의 압축강도에 영향을 미치는 인자들로써 시료의 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포의 함유율 및 양생 방법 등이 주요인자로 알려졌다(김과 이, 2002). 이런 영향인자들을 이용하여 LAS의 임의 배합에 따른 일축압축 강도를 추정하는 기법이 해양연구원에 의해 개발되었다(윤과 김, 2004). 이 기법은 현장발생토의 초기함수비, 시멘트 첨가량, 기포첨가량을 고려한 정규화계수로 표현되는 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시한 것으로 정규화계수가 원료토의 채취지역에 따라 달라지는 것으로 나타났다(윤과 유, 2004). 원료토의 채취지역에 따라 LAS의 일축압축강도가 달라지는 이유는 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 상호간섭에 의한 영향으로 보여지며, 이들의 상호작용이 LAS의 압축강도에 어떤 역할을

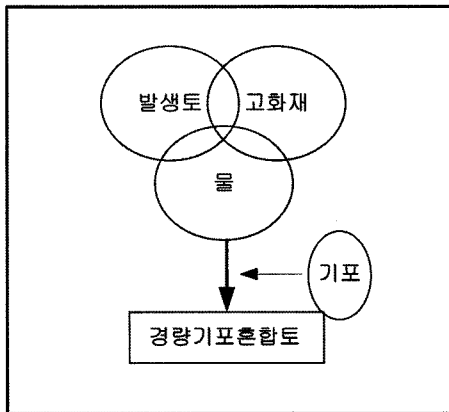


그림 1. LAS의 재료

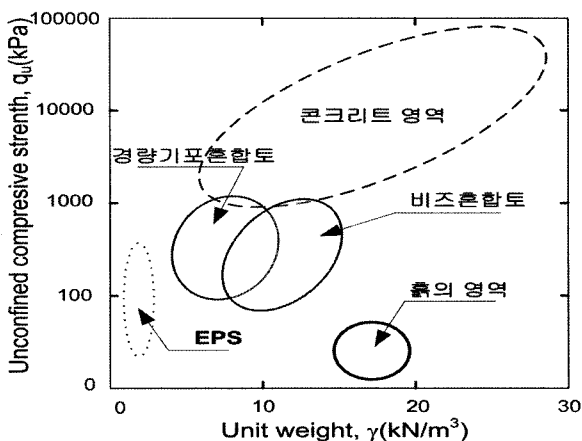


그림 2. 각 재료의 밀도에 따른 일축압축강도

하는지에 대한 분석이 요구되어진다. 이런 분석을 통해 동일 현장에서 발생하는 다양한 원료토 중 LAS의 강도발현에 최적인 원료토를 쉽게 선별할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 최소시멘트 첨가량으로 최대강도를 발현할 수 있는 원료토의 기준을 제시하기위해, 총 5종류의 모래, 실트, 점토의 함유율이 다른 원료토를 선별하여 LAS로 제작하였으며, 7일과 28일의 양생과정을 거쳐 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험결과를 분석하여 원료토의 물리적 특성이 LAS의 압축강도와 기포의 소포에 어떤 영향을 미치는지 규명하였다.

## 2. LAS의 구성

본 연구에서는 LAS의 강도-변형특성에 영향을 미치는 인자를 분석하기위해 원료토의 입도분석시험결과 산출된 모래, 실트, 점토의 함유율이 서로 다른 건설발생토를 이용하여 일축압축강도시험을 수행하였다(그림 4 참조). 채취한 건설발생토의 지반공학적 특성치를 분석하기 위해 KS규정에 따라 시험을 수행하였다(표 1 참조). 기포제로는 기포의 소포율이 낮은 계면활성제를 이용하였다(표 2 참조). 기포제와 물의 비율은 1:19, 공기압은  $2\sim 3\text{kgf/cm}^2$ 로, 그림 3의 일본 OKASAN에서 개

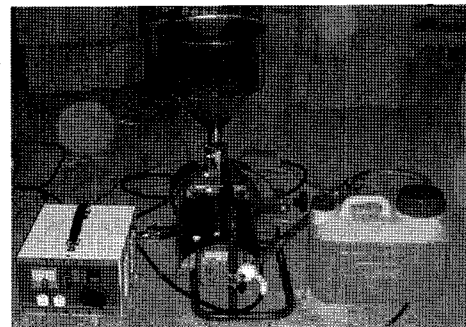


그림 3. 기포 발생장치

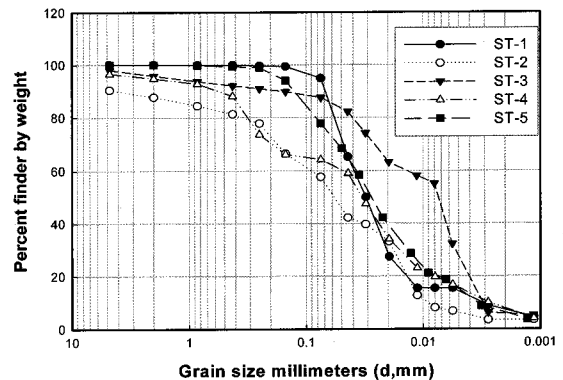


그림 4. 사용한 원료토의 입도분포 곡선

표 1. 사용한 원료토의 물리적 특성

항목 시료	함수비, $W_n$ (%)	비중, $G_s$	액성한계, LL (%)	소성지수, PI	균등계수, $C_u$	곡률계수, $C_g$	모래, $S_{60}$ (%)	실트, $M_{60}$ (%)	점토, $C_l$ (%)	USCS
ST-1	28.42	2.67	N.P.	N.P.	12.5	3.45	5.12	80.08	14.8	ML
ST-2	28.42	2.62	47.18	16.62	9	0.36	34.25	55.78	9.97	CL
ST-3	36.04	2.71	43.29	14.21	4.24	0.65	8.63	64.23	27.14	CL
ST-4	33.98	2.68	40.36	18.47	16.33	1.97	32.32	49.46	18.22	CL
ST-5	48.71	2.67	33.8	12.3	10.28	1.47	22.18	62.80	15.02	CL

\* ST : Abbreviated form of soil type, 모래, 실트, 점토 분류시험 : KS F 2302

표 2. 기포제의 특성

비중 ( $G_s$ )	pH (4℃)	비누화 값	침전값
0.985~1.015	5~8	5이하	0

발한 OKG-01M모형을 이용하여 기포를 제작하였다. 사용한 고화제는 1종 보통포클랜드 시멘트를 사용하였다.

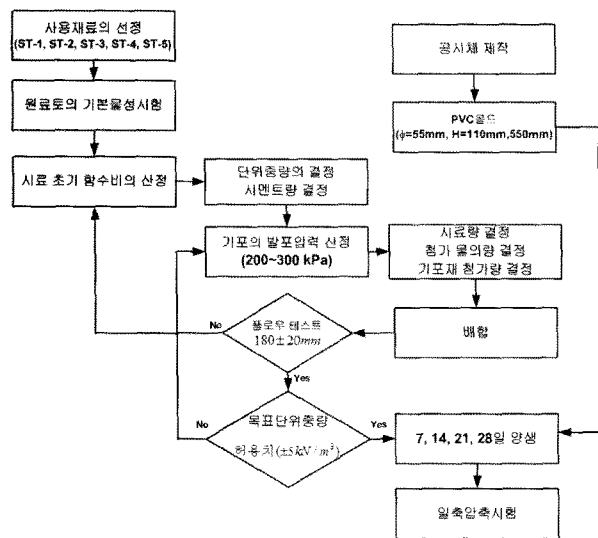


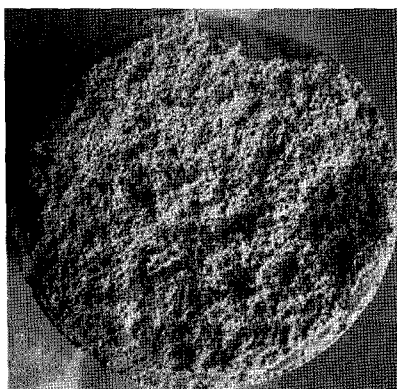
그림 5. LAS의 제작과정

### 3. LAS의 배합

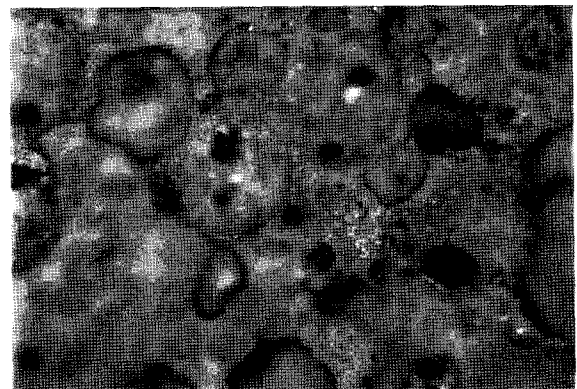
원료토의 물리적 특성에 따른 LAS의 역학적 특성 및 강도발현에 영향을 미치는 인자들을 분석하기 위해 총 5종류의 원료토로 공시체를 제작하였으며, 공시체 몰더는 직경 5.5cm, 높이 11cm인 PVC파이프를 이용하였다. LAS의 제작은 목표단위중량을 설정한 후, 배합표를 이용하여 원료토에 물을 첨가하고, 함수비 200~300%인 슬러리를 만든 다음, 준비된 슬러리에 시멘트를 첨가 후, 마지막으로 기포제를 첨가하여 원하는 목표단위중량의 LAS를 제작하였다. LAS의 제작과정은 그림 5와 같다. 고화 후 LAS가 공시체몰더의 벽면에 부착되는 것을 방지하기 위해 실리콘그리스(silicone grease)로 공시체 몰더의 내부 벽면을 코팅처리하였다. 배합 및 시험조건은 표 3과 같다. 또한 발포된 기포를 즉시 사용하여

표 3. 배합 및 시험 조건

항목	배합 및 시험조건
원료토	ST-1, ST-2, ST-3, ST-4, ST-5
시멘트 첨가량, $C_f$ ( $kN/m^3$ )	2, 2.5, 3
목표단위중량, $\gamma_m$ ( $kN/m^3$ )	7, 9, 11
양생기간, $T_c$ (day)	7, 14, 21, 28



(a) 공시체단면



(b) 광학현미경 촬영(30배 확대)

그림 6. LAS 단면

제작 시 발생할 수 있는 기포의 소산을 최소화 하였으며, 공시체의 목표단위중량을 검토한 결과 오차범위  $\pm 5\%$ 이내로 만족하고, 전체단면과 광학현미경을 이용한 부분촬영을 한 그림 6을 살펴보면 기포의 분포가 양호한 것을 알 수 있다.

#### 4. LAS의 일축압축특성

##### 4.1 응력-변형 특성

동일 원료토에 대해 LAS의 목표단위중량과 첨가된 시멘트량에 따른 응력-변형특성을 분석하였다. 분석결과 동일 원료토일 경우 시멘트 첨가량이 동일하다면 LAS의 단위중량이 증가할수록 강도 및 변형계수가 증가하였으며, 단위중량이 동일하다면 시멘트 첨가량이 증가할수록 강도 및 변형계수가 크게 증가하였다(그림 7, 그림 8 참조).

단위중량과 원료토의 종류에 따른 LAS의 파괴형상을 분석하기 위해 시멘트첨가량이  $2kN/m^3$ 인 시료를 대상으로, 일축압축시험결과를 분석하였다. 축방향 변형률이 0.5% 증가 할 때마다 사진촬영을 실시한 결과, 목표

단위중량이  $7kN/m^3$ 인 경우 변형률의 증가에 따라 뚜렷한 파괴 형상이 나타나지 않고 벌집파괴(bulging failure)의 경향이 나타났다(그림 9 참조). 이와 달리 단위중량이  $9kN/m^3$ 인 경우는 전반적인 영역에서 파괴가 나타났으며(그림 10 참조), 단위중량이  $11kN/m^3$ 에서는 대부분의 공시체가 상부에서 먼저 파괴가 발생하는 것으로 나타났다(그림 11 참조). 그러나 상부의 국부파괴가 발생한 후, 단위중량  $9kN/m^3$ 와 같이 전반적인 파괴로 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 기포제 점성의 영향으로 보여진다. 즉 슬러리화된 원료토에 첨가된 기포제의 첨가량이 단위중량이 높아질수록 감소되기 때문에 이로 인해 상부의 일부분에서 원료토가 균질하게 분포 하지 못해 발생하는 현상으로 보여진다.

##### 4.2 일축압축강도-변형계수의 관계

양생일 28일을 기준으로 LAS의 일축압축강도와 변형계수의 상관관계를 산정하였다(그림 12 참조). 일본의 건설발생토를 대상으로 시험한 결과에서도 나타나듯이 일축압축강도와 변형계수의 관계가 일정한 상한선과 하한선 안에서 분산된 분포를 보이는 것을 볼 수

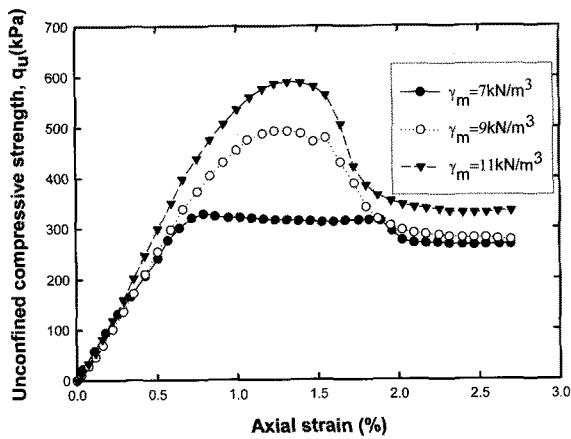


그림 7. 단위중량에 따른 응력-변형거동

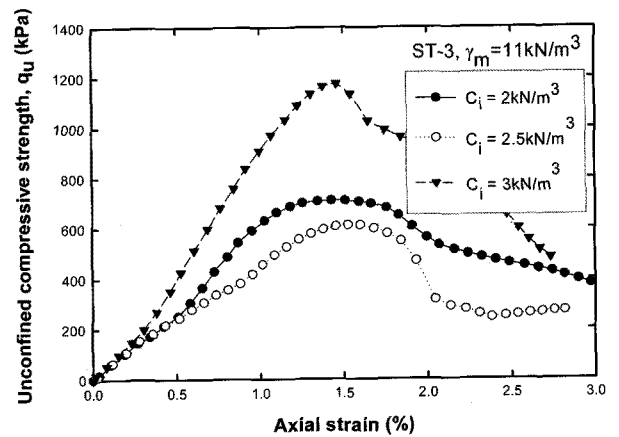


그림 8. 시멘트 첨가량에 따른 응력-변형거동

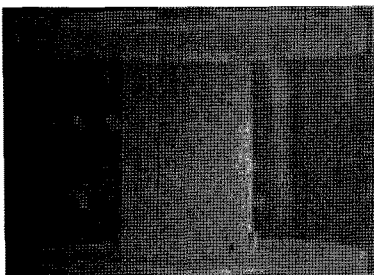


그림 9.  $\gamma_m = 7kN/m^3$ ,  $\epsilon = 4\%$

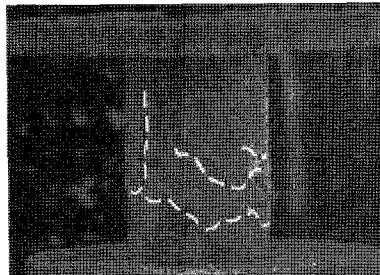


그림 10.  $\gamma_m = 9kN/m^3$ ,  $\epsilon = 2\%$

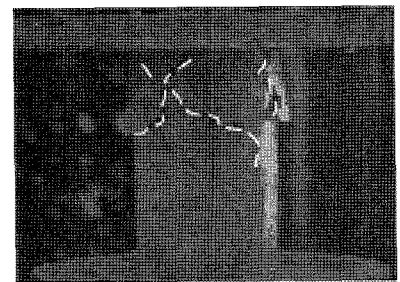
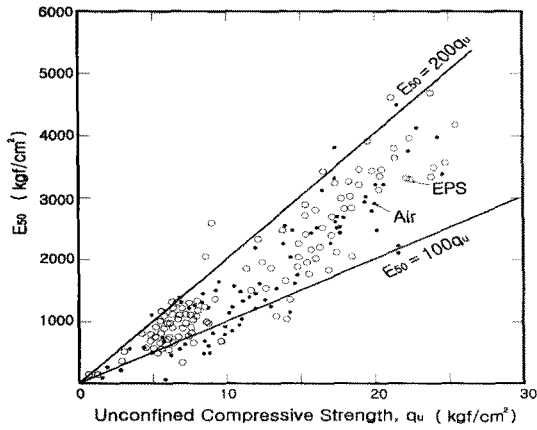
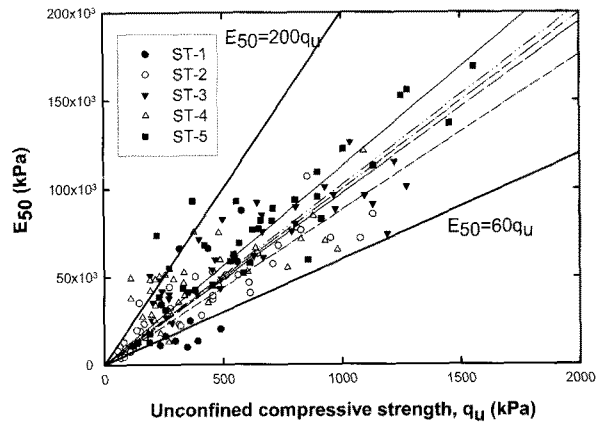


그림 11.  $\gamma_m = 11kN/m^3$ ,  $\epsilon = 2\%$



(a) 일본점토



(b) 본 연구 결과

그림 12. 일축압축강도와  $E_{50}$ 의 관계

표 4. 시료별 일축압축강도와  $E_{50}$ 의 관계

원료토	관계식
ST-1	$E_{50} = 97q_u$
ST-2	$E_{50} = 88q_u$
ST-3	$E_{50} = 100q_u$
ST-4	$E_{50} = 102q_u$
ST-5	$E_{50} = 113q_u$

있다. 이는 원료토의 특성에 기인하는 것으로 보이며 실제 한국의 다양한 건설발생토를 가지고 시험한 결과 하한값의 기울기가 60정도로 일본의 값보다 약 40정도 낮게 산정되었다. 그러나 상한 값은 거의 유사하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 하한값의 대부분은 단위중량이 낮은 LAS에서 발생하는 것으로 압축강도가 동일 하더라도 동일 하중에서 더 많은 변형을 유발하는 것으로 나타났다. 일축압축강도와 변형계수의 상관관계를

산정하면, 일본 내 건설발생토의 경우 식 (1)과 같은 범위를 가지며(Tsuchida, 1999), 본 연구에서 제시하는 범위는 식 (2)와 같다. 또한 각 시료별로 일축압축강도와 변형계수의 관계를 수식화해 보면 표 4와 같다.

$$E_{50} = (100 \sim 200) \cdot q_u \quad (1)$$

$$E_{50} = (60 \sim 200) \cdot q_u \quad (2)$$

여기서,  $E_{50}$ : 변형계수,  $q_u$ : 일축압축강도

### 4.3 목표단위중량과 시멘트 첨가량의 영향

그림 13~16은 양생기간 28일의 일축압축강도로 원료토별 시멘트 첨가량과 목표단위중량에 따른 일축압축강도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 원료토 모두 단위중량과 시멘트 첨가량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였으며, 이를 수식으로 표현

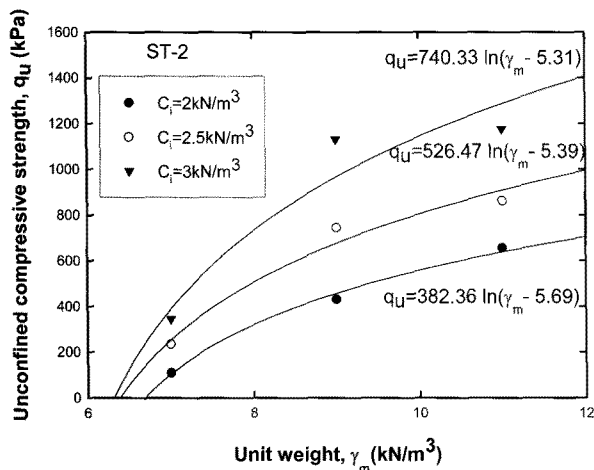


그림 13. ST-2의 단위중량별 일축압축강도

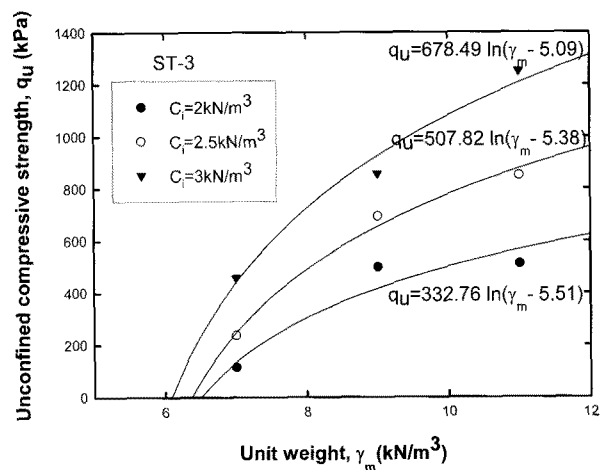


그림 14. ST-3의 단위중량별 일축압축강도

하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 각 계수의 값은 더 많은 실험을 통해 확정될 필요가 있다. 이는 원료토의 특성에 따라 동일 시멘트량과 목표단위중량일 지라도 상관관계의 변화율이 달라지기 때문에 더 많은 자료가 축적되어야 정확한 계수의 적용이 가능할 것으로 보이며, 본 연구결과 LAS의 일축압축강도 예측식 (3)과 같은 상관관계식을 산출할 수 있었다.

$$q_{u28} = \eta \cdot \ln(\gamma_m - \kappa) \quad (3)$$

여기서,  $q_{u28}$ : 양생 28일의 일축압축강도,  $\gamma_m$ : 목표단위중량,  $\eta$ ,  $\kappa$ : 실험정수

식 (3)에서 구한  $\eta$ 는 목표단위중량에 따른 일축압축강도의 변화를 의미하는 값이다. 이 값을 시멘트 첨가량과 비교하여 도시화하면 시멘트 첨가량이 증가할수록  $\eta$ 의 값이 증가하여 일축압축강도가 증가하는 것을 알

수 있다(그림 17 참조).  $\kappa+1$ 은 일축압축강도가 0이 되는 단위중량을 의미하는 값으로, LAS가 강도를 가지기 시작하는 최소 값 즉, 경량화 할 수 있는 최소 목표단위중량을 나타낸다.  $\kappa$ 는 시멘트 첨가량의 영향을 받고 있으며, 시멘트 첨가량이 증가하면  $\kappa$ 는 감소하여, 목표단위중량을 더욱 감소시킬 수 있다(그림 18 참조).

#### 4.4 원료토 특성에 따른 일축압축강도

원료토의 특성에 따른 일축압축강도의 변화를 알아보기 위해, 양생 28일, 목표단위중량  $11kN/m^3$ 의 조건에 시멘트 첨가량을 2, 2.5,  $3kN/m^3$ 로 달리하여 분석하였다. 그림 19, 20은 원료토의 물리적 특성과 일축압축강도의 변화를 도시화 한 것으로, 소성지수, 곡률계수 등과의 상관관계를 분석하였다. 분석결과 단일변수와의 상관관계는 일부 조건에서는 뚜렷한 상관관계를 나타

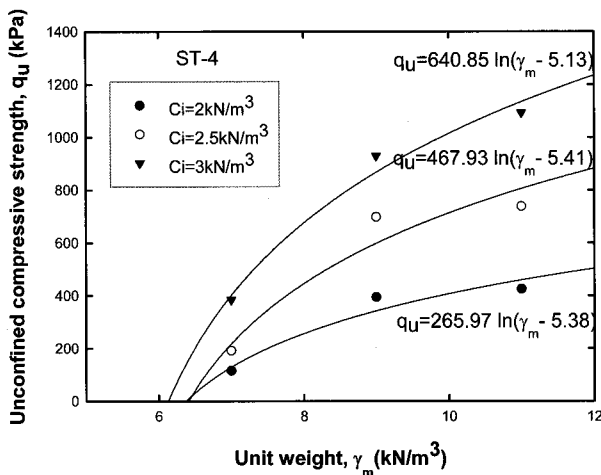


그림 15. ST-4의 단위중량별 일축압축강도

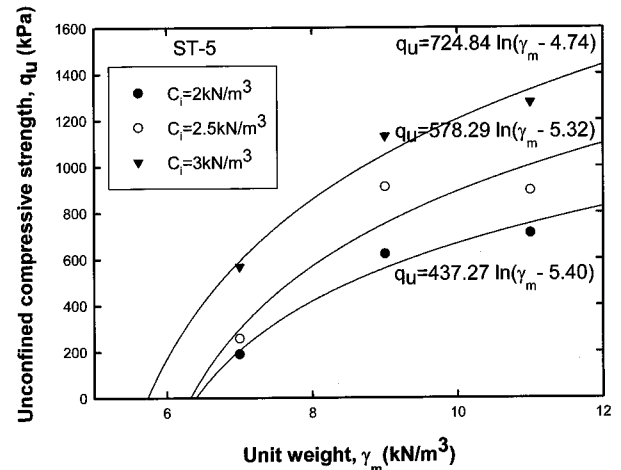


그림 16. ST-5의 단위중량별 일축압축강도

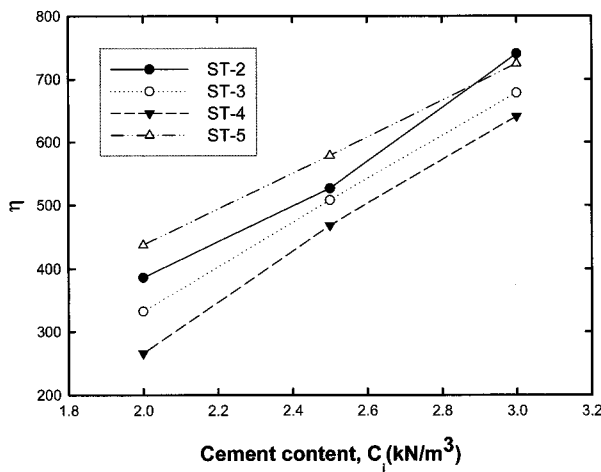


그림 17. 시멘트 첨가량에 대한  $\eta$ 의 변화

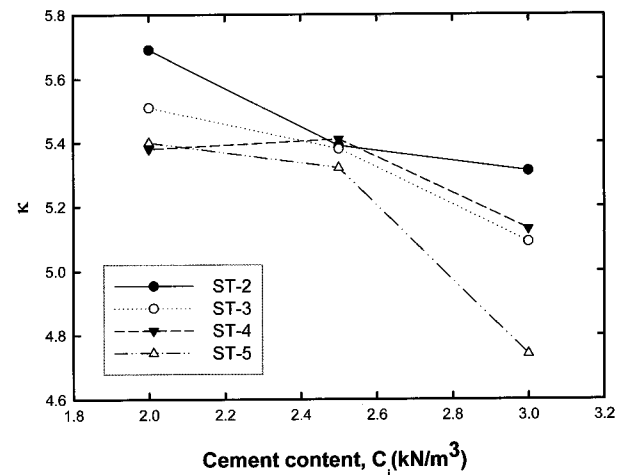


그림 18. 시멘트 첨가량에 대한  $\kappa$ 의 변화

내지만 일반화하기에는 분산이 큰 것으로 나타났다. 이는 동일한 물리적 특성을 가진 원료토라도 모래, 실트, 점토의 비율이 다를 수 있으며, 실제 강도에 영향을 미치는 직접적인 인자는 모래, 실트, 점토 입자이므로 이들과의 상관관계를 분석하는 것이 필요하다. 따라서 입도분석시험결과 산출된 원료토의 모래, 실트, 점토의 함유율과 각 비율과의 상관관계를 분석하여 일축압축강도와와의 연관성을 찾는 것이 필요하다. 먼저 모래, 실트, 점토의 각 함유율과 일축압축강도를 분석한 결과 모래와 점토의 함유율이 증가하면 일축압축 강도가 낮아지며, 반대로 실트의 함유율이 높으면 일축압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다(그림 21~23 참조). 하지만 각각의 독립된 변수만을 고려하여 강도와의 상관관계를 규명하는 것은 각 변수에 대한 분산이 크며, 뚜렷한 상관관계를 규명하기엔 무리가 있다고 판단된다. 이러한 경향을 반영하여 모래, 실트, 점토의 각 비율을 고려한

식 (4)를 제안하며, 동일한 모래함유율에 실트와 점토의 비율이 서로 다른 원료토의 일축압축강도시험결과를 분석한 결과 식 (4)는 뚜렷한 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

즉,  $\lambda$ 의 값은 모래의 함유율에 의해 달라지며, 그림 24에 나타나듯이 모래의 함유율이 같으면 실트와 점토의 함유율의 비에 따라 일축압축강도가 선형적인 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러므로 동일한 모래 함유율에 대해 실트와 점토의 비율을 달리하여 실험하면  $\lambda$ 의 값을 산정할 수 있을 것이다.

$$\lambda = \frac{M}{S \cdot C} \quad (4)$$

여기서,  $M$ : 실트함유율(%),  $S$ : 모래함유율(%),  $C$ : 점토 함유율(%)

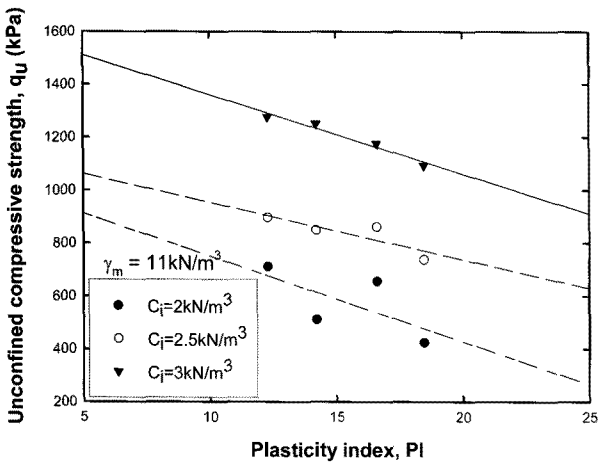


그림 19. 소성지수와 일축압축강도

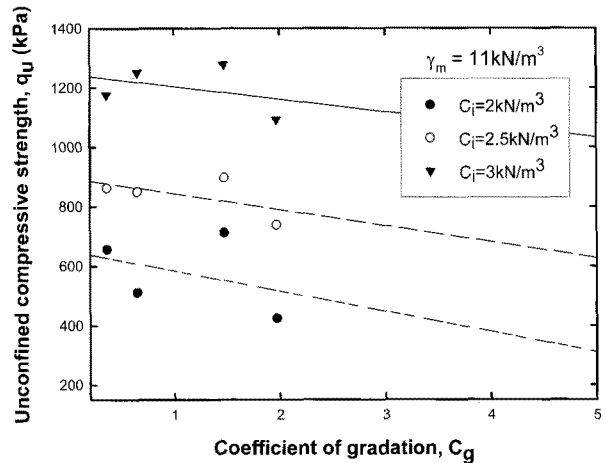


그림 20. 곡률계수와 일축압축강도

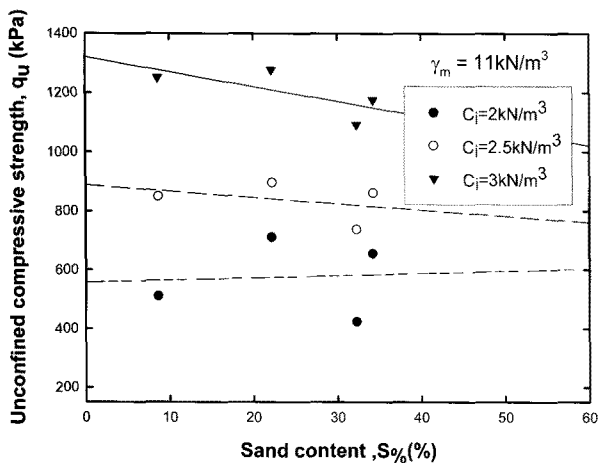


그림 21. 모래함유율과 일축압축강도

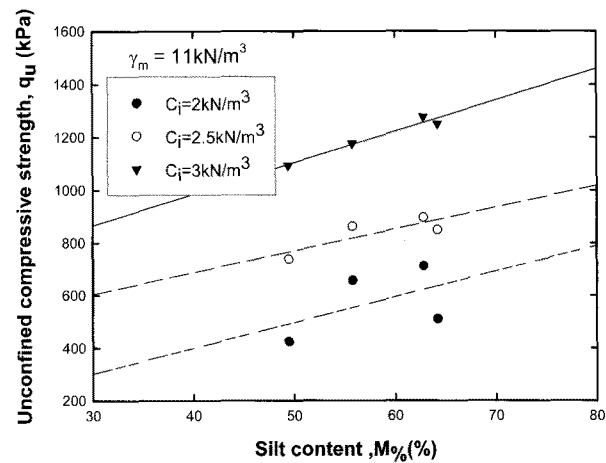


그림 22. 실트함유율과 일축압축강도

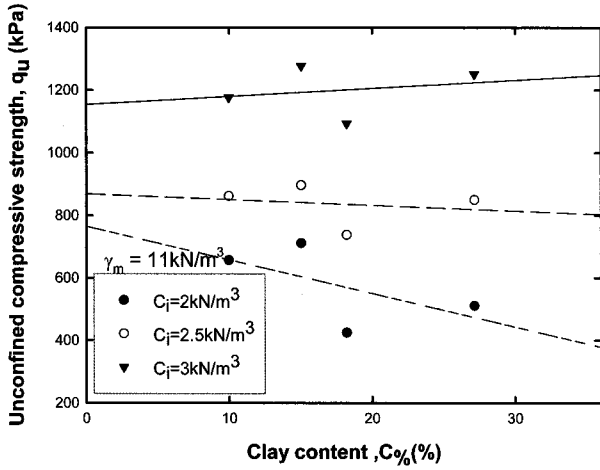


그림 23. 점토함유율과 일축압축강도

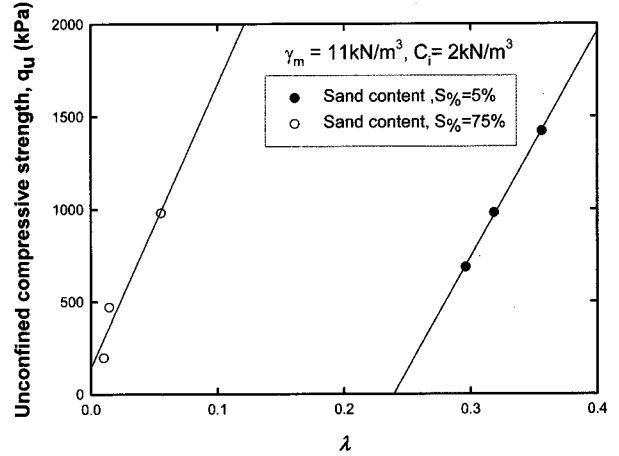


그림 24.  $\lambda$ 에 의한 일축압축강도의 변화

#### 4.5 재령일 따른 일축압축강도의 변화

일축압축강도는 시간에 따라 증가하며, 이러한 일축압축강도의 증가는 원료토의 특성에 따라 달라진다. 현재 LAS의 강도발현율은 7일과 28일 강도를 기준으로 정하고 있으며, 그 기울기를 강도발현율( $\alpha$ )이라고 한다. 강도발현율은 원료토의 특성 중 점토함유율( $C_{\%}$ )과 뚜렷한 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 그림 26은 점토함유율과 강도발현율의 관계를 도시화 한 것으로, 식 (5)가 산정되었다. 즉 점토함유율이 높을수록 양생시간에 따른 강도발현이 낮아지며, 이는 점토가 시멘트의 수화반응을 억제하므로, 점토의 함유율이 높을수록 초기 강도 및 장기강도의 발현속도를 저하시키는 것으로 보여진다.

$$q_{u28} = [2.59 - 0.37 \ln(C_{\%})] \cdot q_{u7} \quad (5)$$

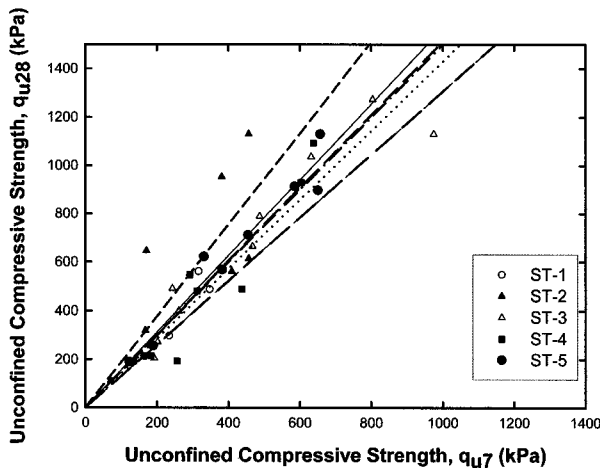


그림 25. 재령 7일에 대한 재령 28일의 일축압축강도

여기서,  $q_{u7}$ : 양생 7일의 일축압축강도,  $q_{u28}$ : 양생 28일의 일축압축강도,  $C_{\%}$ : 점토함유율(%)

#### 4.6 타설높이의 영향

본 연구에서는 원료토의 종류에 따라 양생과정에서 발생하는 LAS의 재료 분리현상을 파악하기 위해, 실제 현장 시공 시의 1회 타설높이 50cm를 고려하여, 심도별 단위중량 및 일축압축강도의 변화를 분석하였다. 시멘트 첨가량  $C_i = 3 \text{ kN/m}^3$ , 목표단위중량  $\gamma_m = 11 \text{ kN/m}^3$ 으로 고정하고 원료토를 달리하여, 공시체를 55cm로 제작한 후, 28일간 양생시키고 11cm로 커팅하여 각 공시체에 대한 일축압축시험을 수행하였다(그림 27 참조). 그림 28은 심도별 단위중량의 변화를, 그림 29는 심도별 일축압축강도의 변화를 도시화한 것이다. 하부로 갈수

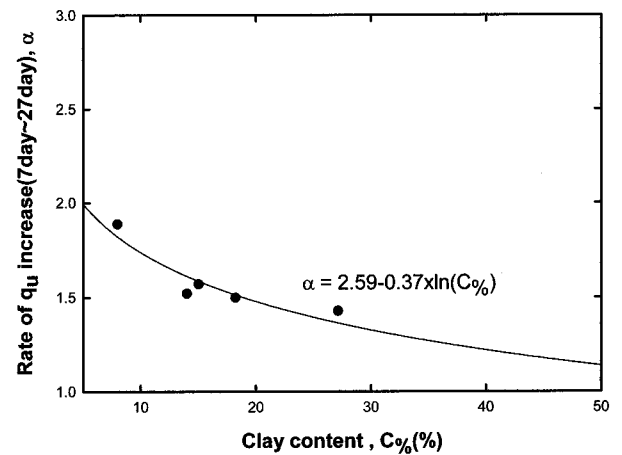


그림 26. 점토함유율( $C_{\%}$ )에 따른 강도발현율( $\alpha$ )



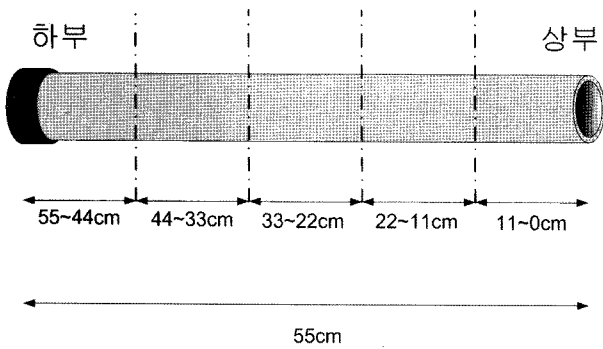


그림 27. 높이 55cm의 공시체

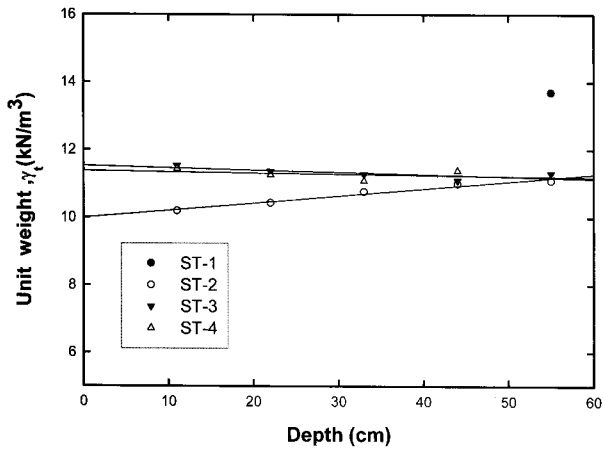


그림 28. 심도별 단위중량

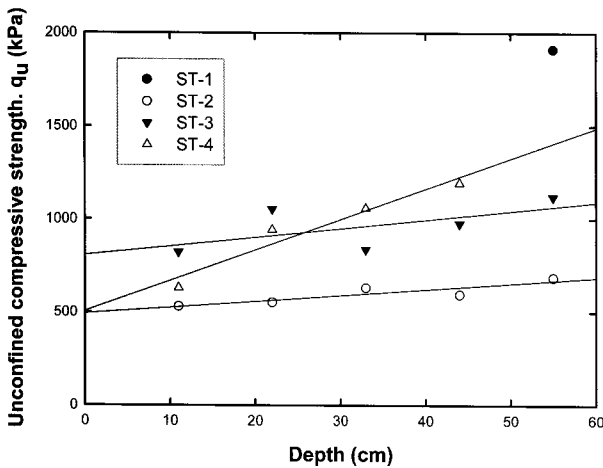


그림 29. 심도별 일축압축강도

록 일축압축강도가 증가하며, 그 증가는 시료별로 일정한 기울기 값을 보인다. 이 기울기 값을 각 시료의 곡률계수( $C_g$ )로 도시화해 보면, 곡률계수( $C_g$ )가 증가할수록 깊이에 따른 일축압축강도의 변화율( $\beta$ )이 크게 나타남을 알 수 있다(그림 30 참조). 또한 곡률계수의 변화가 심하고 조립토의 함유율이 높을 경우, 기포의 소산율이 높은 것으로 나타났으며, ST-1의 경우 심한 기포의 소산 현상으로 최하부에서만 실험이 가능하였다. 따라서 이

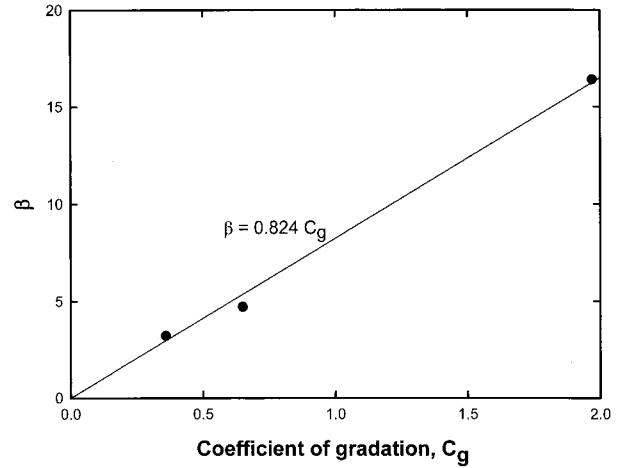


그림 30. 곡률계수( $C_g$ )와 심도에 따른 강도변화율( $\beta$ )

와 같은 원료토를 이용할 경우에는 타설 높이를 제한할 필요가 있겠다.

## 5. 결론

본 연구에서는 부산지역의 다양한 원료토를 이용하여 제작한 경량기포혼합토(LAS)의 일축압축시험으로, LAS의 역학적 특성에 영향을 미치는 원료토의 특성과 시멘트 첨가량, 목표단위중량, 양생일의 영향을 정량적으로 분석하였으며, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- (1) LAS의 응력-변형률 관계는 단위중량과 시멘트 첨가량이 낮을수록 뚜렷한 파괴점이 없는 벌징파괴(bulging failure)의 형태를 보이며, 단위중량과 시멘트 첨가량이 높을수록 뚜렷한 파괴점이 나타나는 취성파괴의 형태를 보인다. 또한 단위중량이  $7kN/m^3$  이하에서는 벌징파괴형상,  $7\sim 9kN/m^3$ 에서는 전반파괴형상을 보이며,  $11kN/m^3$  경우에는 상부의 국부파괴에서 전반전단파괴형상으로, LAS의 목표단위중량에 따라 다른 파괴형상을 보인다. 이는 기포제 점성의 영향으로 보여진다. 즉 슬러리화된 원료토에 첨가된 기포제의 첨가량이 단위중량이 높아질수록 감소되기 때문에 이로 인해 상부의 일부분에서 원료토가 균질하게 분포 하지 못해 발생하는 현상으로 판단된다.
- (2) LAS의 변형계수( $E_{50}$ )와 일축압축강도의 관계는  $E_{50} = (60\sim 200)q_u$ 의 관계를 보이며 일본의 건설발생토를 대상으로 시험한 결과에서 얻어진  $E_{50} = (100\sim 200)q_u$

와 비교하면 다소 낮은 값을 가진다. 또한 하한값의 대부분은 단위중량이 낮은 LAS에서 발생하며, 압축강도가 동일하더라도 동일 하중에서 더 많은 변형을 유발한다.

- (3) 시멘트 첨가량과 단위중량은 일축압축강도에 지배적인 요소로 일축압축강도에 큰 영향을 가지며 그 관계식은  $q_{u28} = \eta \cdot \ln(\gamma_t - \kappa)$ 의 형태로,  $\eta$ ,  $\kappa$ 는 시멘트 첨가량의 변화에 따라 달라진다.
- (4) 일축압축강도는 모래와 점토의 함유율이 많아질수록 저하되며, 실트의 함유율의 증가는 강도발현에 도움을 준다. 이것을 고려한  $\lambda = \frac{M}{S \cdot C}$ 를 이용하여 일축압축강도를 정규화 할 수 있다.  $\lambda$ 의 값은 모래의 함유율에 의해 달라지며, 모래의 함유율이 같으면 실트와 점토의 함유율의 비에 따라 일축압축강도가 선형적인 상관성을 가진다.
- (5) 재령일에 따른 강도발현률( $a$ )은 점토함유율( $C_{\%}$ )이 높을수록 감소된다. 이는 점토가 시멘트의 수화반응을 억제하여 점토의 함유율이 높을수록 강도의 발현속도가 저하되기 때문이며, 본 연구의 결과 양생 28일의 강도는  $q_{u28} = [2.59 - 0.37\ln(C_{\%})] \cdot q_{u7}$ 의 관계를 가진다.
- (6) LAS의 타설높이에 따른 일축압축강도는 곡률계수

가 커지면 상부와 하부의 단위중량 및 강도차이가 더 크게 발생한다. 또한 곡률계수의 변화가 심하고 조립토의 함유율이 높을 경우 기포의 소산율이 높으므로 이와 같은 원료토를 LAS로 이용할 경우 타설높이를 제한하고, 현장 시공 LAS의 목표단위중량과 강도를 확인하는 것이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김주철, 이종규 (2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 4호, pp.309-317.
2. 윤길립, 김병탁 (2004), “경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 4호, pp.5-13.
3. 윤길립, 유승경 (2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 9호, pp.125-131.
4. 윤길립, 유승경 (2005), “수중양생 및 수압조건을 고려한 경량기포혼합토의 거동”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 4호, pp.21-29.
5. 동서화학공업주식회사 (2007), “기포혼합토공법 기술자료”.
6. 土田孝 (1999), “港灣空港事業としての輕量混合處理土工法の開發と適用事例”, *運輸省港灣技術研究所 港灣技研資料* 第38卷 第2号.

(접수일자 2008. 10. 15, 심사완료일 2008. 11. 24)