

## 화강풍화토를 이용한 CLSM의 공학적 특성평가

### Evaluation of Engineering Properties of CLSM using Weathered Granite Soils

임유진\* · 서창범\*\*

Lim, Yujin · Seo, Chang Beom

#### Abstract

In this study, flowable backfill made with weathered granite soil is tested to provide basic engineering properties that can be used as design input to overcome settlement problems in road pavement due to low stiffness of backfill which is generated by porosity of the soil. For design purpose, a proper mixing ratio is developed first. Then several test methods including FF/RC, PMT and LDWT including axial compression test are adapted for checking stiffness and measuring axial strength of the material separately that can be used for design values.

**Key words** : CLSM, Pressuremeter test, LDWT, FFRC, Dynamic modulus

#### 요 지

본 연구는 뒷채움재로 사용하는 입상재료의 다공성으로 인하여 발생하는 강성 부족과 이로 인한 변형발생 등의 문제를 극복하기 위한 방법으로서 국내 지표특성상 가장 풍부한 화강풍화토를 사용한 유동성뒷채움재(CLSM)의 배합특성을 분석하였으며 설계배합비에 따른 강도와 강성 발현 특성을 자유단공진주시험(FF/RC), 공내재하시험(PMT) 및 동적평판재하시험(LDWT) 등으로 분석하여 향후 뒷채움재용 화강풍화토 CLSM의 설계 및 시공에 필요한 기초 데이터를 제시하였다.

**핵심용어** : CLSM, 공내재하시험(PMT), 동적평판재하시험(LDWT), 자유단공진주시험, 동적탄성계수

#### 1. 서 론

일반적으로 포장하부층을 구성하는 기층과 보조기층 및 노상재료는 최적의 다짐도를 확보하여 차륜하중으로 인해 발생하는 추가응력에 대하여 최소의 변형과 처짐이 발생하도록 설계되어야 한다. 그러나 현재 다짐장비 등 외부 기계적 에너지 효율의 증가와 이에 따른 다짐효율의 개선에도 불구하고 장기공용중인 대부분의 도로현장에서는 여전히 처짐과 단차가 발생, 관찰되고 있어 주행 중 차량의 승차감과 주행성의 감소 및 이로 인한 차량사고 발생 등의 주요 원인이 되고 있다.

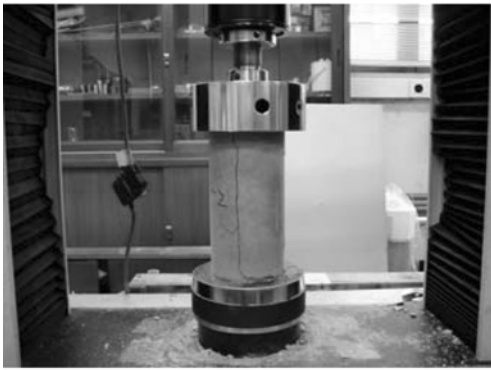
포장하부를 구성하는 재료 또는 기존의 뒷채움재는 주로 양질의 사질토를 이용하며, 일정한 강도를 확보하고 침하에 대한 안정성을 증가시키기 위해 폴러와 같은 다짐 장비를 이용하여 기계다짐을 실시한다. 그러나 뒷채움재료로 사용하는 입상재료의 공극성으로 인한 재료적인 문제, 다짐장비의 주행성 및 다짐효율 부족 등으로 인해 뒷채움재의 부실한 시공사례가 발생하고 이로 인하여 각종 구조물의 파손, 즉 지하매설물의 파손 및 도로포장 침하 등의 주요한 원인이 되고 있

다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저강도 콘크리트의 일종인 CLSM(Controlled Low-Strength Materials)을 지반 및 도로 분야에 적용하려는 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다(이관호 외, 2001; 박재현 외, 2003).

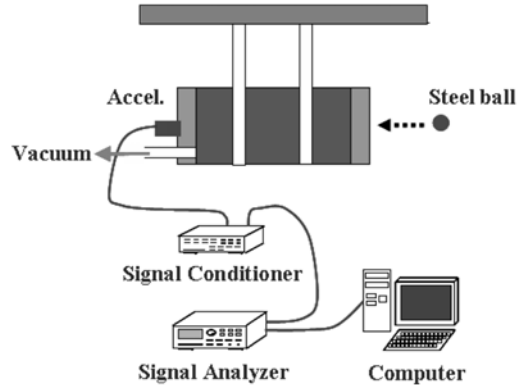
미국 콘크리트 협회(The American Concrete Institute; ACI, 1994)에서는 CLSM을 “지체 점착성을 가지는 재료로서 초기에는 흐름특성 즉, 유동성을 갖지만 양생이 진행에 따라 강도가 증가하여 재령 28일 압축강도가 8.3 MPa 보다 작은 재료”로 정의하고 있다. CLSM은 유동성 뒷채움재(flowable fill), 비수축 채움재(unshrinkable fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 유동성 모르타르(flowable mortar), 흙-시멘트 슬러리(soil-cement slurry), K-Krete 등으로 불리고, 이의 대표적인 특성으로는 자기수평능(self-leveling), 자기다짐성(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절능, 시공 후 재 굴착의 용이성 및 시공단계 단축에 의한 시공비 절감가능성의 특징을 갖는다(원종필 외, 2000). 이러한 다양한 특성을 가진 CLSM은 기존의 뒷채움재 사용시 발생하는 부적절 다짐으로 인해 발생하는 침하 및 균열 등의 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

\*정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수(E-mail : yujin@pcu.ac.kr)

\*\*배재대학교 건설환경공학과 석사과정



(a)



(b)

그림 1. 공시체의 강도 및 강성 평가 : (a)일축압축강도시험, (b)자유단 공진주시험

유동성 뒷채움재는 주로 모래, 플라이애쉬, 시멘트 및 물을 적절히 혼합하여 만들며 초기에는 물과 플라이애쉬의 영향으로 충분한 유동성(flowability)을 가지지만 시간이 지나면서 시멘트 성분이 양생되며 소정의 강도와 강성을 갖게 된다.

본 연구는 이와 같이 입상재료가 가진 다공성으로 발생하는 강성 부족과 이로 인한 변형발생 등의 문제를 극복하기 위한 방법으로서 국내 지표특성상 가장 풍부한 화강풍화토를 사용한 CLSM 배합특성을 살핀 후 설계배합비에 따른 강도와 강성 발현 특성을 분석하여 최적의 뒷채움재용 화강풍화토 CLSM의 설계 및 시공에 필요한 데이터를 제시하는 것이 목적이다.

## 2. 화강풍화토 CLSM에 대한 역학시험

### 2.1 시험개요

유동성 뒷채움재(CLSM) 배합 시 토사재료의 종류와 시멘트 함유비 등의 배합 차이에 따른 유동성 뒷채움재의 물리적 거동특성을 분석하기 위해서 먼저 예비실험을 통해 적정배합비를 도출하였다. 도출된 배합비로 제작한 공시체에 대해 압축강도시험, 자유단 공진주시험(FF/RC)을 수행하여 강도 및 강성 발현특성을 분석하였다. 예비실험으로 도출한 배합비를 이용하여 대형 고결체를 제작하고 공내재하시험(Pressuremeter test; PMT) 및 동적평판재하시험(LDWT)을 실시하였다. 각 시험에서 획득한 결과 값들로부터 토사재료 혼입비율, 시멘트 함유비, 재령일에 따른 강성의 변화를 비교 평가하였다. 특히, 입상재료뿐만 아니라 일반 토사를 사용한 뒷채움재 대체 재료로서의 유동성 뒷채움재의 가장 효과적인 배합비를 도출하기 위하여 우리나라의 대표적인 현장발생 토사재료인 화강풍화토를 이용하여 CLSM을 배합하여 시험하였다.

### 2.2 시험방법

CLSM의 배합 차이에 의한 강성변화를 평가하기 위하여 자유단 공진주시험(FF/RC), 공내재하시험(PMT) 및 동적평판재하시험(LDWT)을 실시하였고 일축압축강도시험을 실시하여 강도변화를 분석하였다. 고화된 재료의 특성상 구속압의 영향은 크지 않을 것으로 판단하여 구속압 효과는 본 시험고려요

소에서 제외하였다. 일축압축 시험 및 자유단 공진주시험(FF/RC)은 소정의 배합비를 고려하여 공시체를 제작한 뒤 일정 재령에서 시험을 실시하였다(그림 1(b)).

자유단 공진주시험은 공시체를 가진하여 압축응력파를 발생시키고 공진주파수를 측정하여 탄성계수를 계산하는 원리를 사용하며 본 연구에서는 가진장치로서 쇠구슬을 자유낙하시켜 타격하는 방법으로 각 공시체의 공진주파수를 획득하였다. 가진시 압축응력파가 양쪽 공시체 끝에서 반사를 반복하게 될 때 공시체 길이( $l$ )의 두 배의 파장에 대한 정현파가 가장 지배적인 성분이 되어 이성분의 주파수를 FFT(Fast Fourier Transfer)처리에 의하여 결정한 후, 식 (1)에 의해 비구속 상태에서의 압축과 속도를 구할 수 있다.

$$V_c = f_c \times \lambda = f_c \times 2l \quad (1)$$

여기서,  $f_c$ 는 비구속압축파의 공진주파수이며 비구속압축파의 속도( $v_c$ )를 이용하여 식 (2)에 의해 탄성계수를 결정할 수 있다.

$$E = \rho \times V_c^2$$

여기서,  $\rho$ 는 공시체의 밀도(Density)이다. 그림 2는 FFT처리에 의하여 구한 전형적인 공진주파수 대역을 도시한 것이다.

PMT 및 LDWT시험은 현장에서의 타설 상황을 상정하여 실내에서 토조 내에 소정의 배합비에 따른 CLSM체를 타설

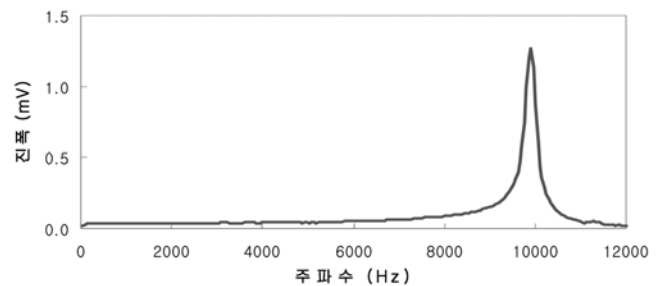


그림 2. 동적신호분석기로 획득한 공진주파수

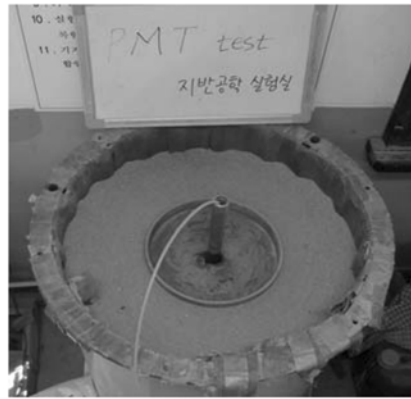
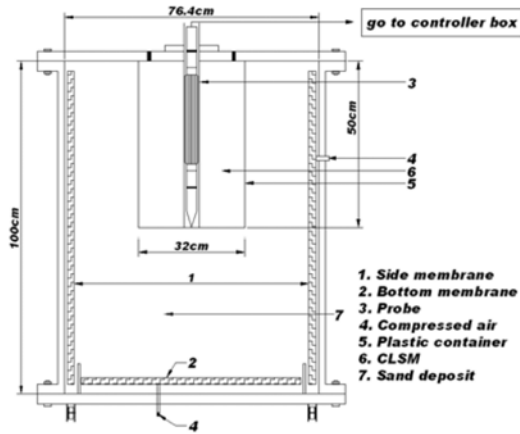


그림 3. PMT 실내시험의 구성모식도 및 시험장면

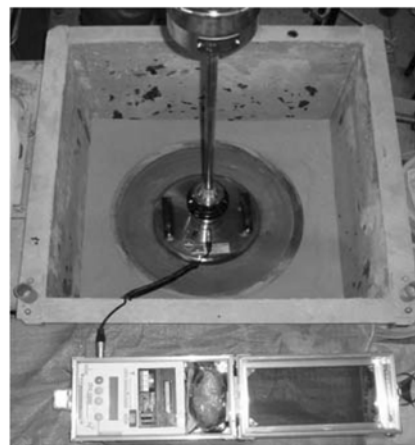
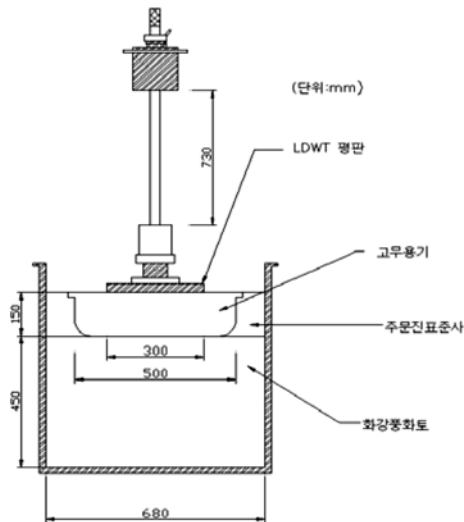
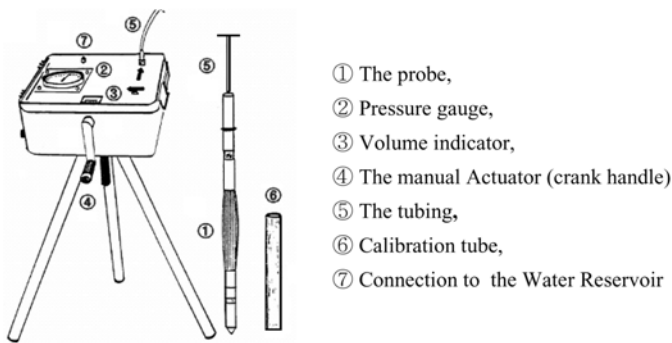


그림 4. LDWT 실내시험의 구성모식도 및 시험장면



- ① The probe,
- ② Pressure gauge,
- ③ Volume indicator,
- ④ The manual Actuator (crank handle)
- ⑤ The tubing,
- ⑥ Calibration tube,
- ⑦ Connection to the Water Reservoir



그림 5. PENCEL형 공내재하시험기의 구성

한 뒤 그림 3 및 그림 4와 같이 시험을 실시하였다.

본 연구를 위해 선정된 PENCEL형 공내재하시험기는 크게 본체, 튜브, 프로브의 3가지로 구성되며 시험기의 각 구성과 명칭은 그림 5와 같다.

공내재하시험(Pressuremeter Test, 이하 PMT)은 원주형의 프로브를 시험하고자 하는 대상 지반내의 천공된 구멍 내에 거치하고 이를 횡방향으로 팽창시켜 주변지반을 가압하는 장치이다(그림 6(a)). 시험시 지반에 가한 횡방향 압력과 프로브의 부피팽창을 측정할 수 있으므로 두 값 사이의 관계로부

터 현장지반의 횡방향 응력( $\sigma$ )-변형률( $\Delta R/R_0$ ) 관계를 설정(그림 6(b) 그림 7(b))할 수 있다. 횡방향 변형률( $\Delta R/R_0$ )은 공경의 팽창변형을 원래의 반경( $R_0$ )에 대한 공경의 증가( $\Delta R$ )비로 표시한 것으로서 방사방향의 변형률( $\epsilon_{\theta\theta}$ )이 된다. 따라서 프로브의 깊이별 위치를 달리하여 시험을 반복하면 깊이 따른 지반변형계수 또는 강성을 파악할 수 있다. 그림 7.은 PMT 초기시험결과로부터 초기접선변형계수( $E_0$ )와 제하-재제하 변형계수( $E_R$ )의 결정방법을 도시한 것이다. 일반 입상재료로 구성된 토사의 경우 제하-재제하 변형계수( $E_R$ )가 초기접선

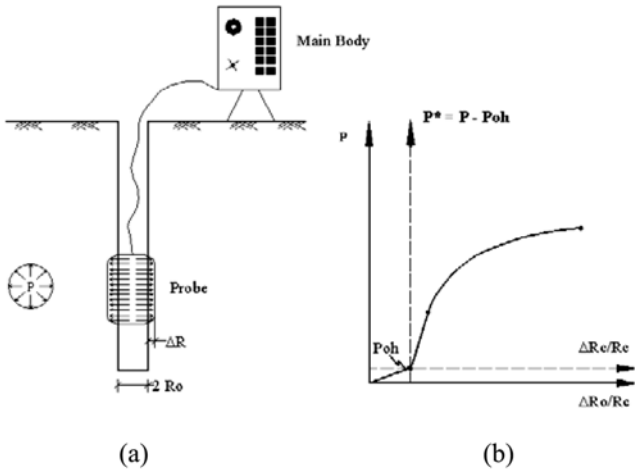


그림 6. 공내재하시험기의 작동원리 개략도 : (a) 시험모식도, (b) 시험결과

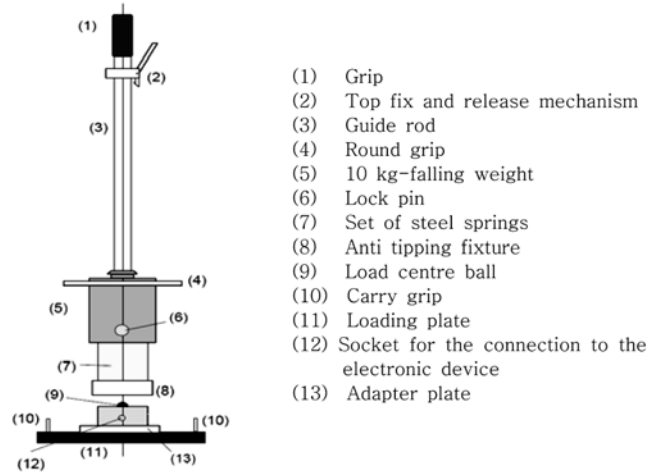


그림 8. Light Drop Weight Tester의 구성

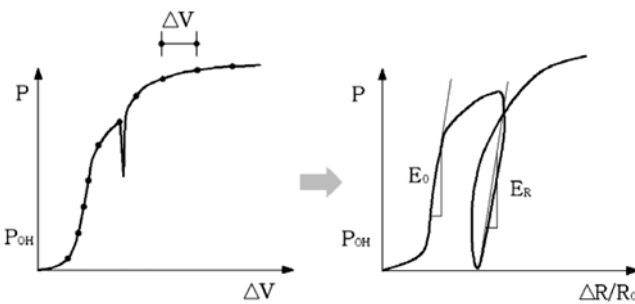


그림 7. 공내재하시험 데이터로부터의 변형계수( $E_0$ ,  $E_R$ ) 전환

변형계수( $E_0$ )의 약 3배쯤 되는 것으로 알려져 있다(임유진 외, 2004).

동평판재하시험(LDWT)은 도로포장 하부층의 강성 또는 지지력을 측정하기 위해 고안된 장비이다. LDWT는 설계개념의 고안된 나라와 제작회사에 따라 약간의 차이는 있으나 그 외형과 작동원리는 유사하다. 또한 운반의 용이성과 지반의 교란 없이 강성과 지지력을 빠르게 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 독일 등 북유럽에서는 도로현장의 다짐 관리 목적으로 이용되고 있다. 본 연구에서는 CLSM이 뒷채움재 또는 포장하부층에 사용되었을 경우를 가정, 포설시의 강성을 평가하기 위하여 독일 GERHARD JORN 사에 의해 개발된 동평판 재하시험기(Light Drop Weight Tester ZFG 2000)를 채택하였다.

동평판재하 시험기는 그림 8과 같이 재하판, 재하추 및 가이드 로드 등으로 구성되며 재하추의 낙하시 발생하는 충격 에너지와 침하량을 이용하여 하부지반의 강성을 측정한다. 본 연구에서는 직경 300 mm의 재하판을 사용하였다.

해당 장비는 낙하고 73 cm에서 수직으로 10 kg의 해머를 3회 자유 낙하시킨 후 3회 평균 탄성계수 값을 구하는 방법

을 취한다. 측정된 결과 값은 센서와 연결된 컨트롤러 PC로 보내어지고 내장된 프로그램에 의해 지반강성이 계산된다. 재하추의 낙하충격에 의해 발생하는 침하량과 충격 시 재하판 하부에 발생하는 압축응력을 이용, 식 (2)에 의해 동적지반반력계수( $E_{vd}$ )를 환산한다.

$$E_{vd}(Mpa) = 1.5r \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \quad (3)$$

여기서,  $r(mm)$  = 평판의 반지름,  $\Delta\sigma(Mpa)$  = 0.1(10 kg의 무게일 경우),  $\Delta s(mm)$  = 침하량

### 2.3 시험재료의 특성

시험에 사용된 각 재료의 물성을 파악하기 위하여 실내물성시험을 실시하였다. CLSM 재료의 구성은 일반 포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬(flyash) 및 현장발생토 등의 토사재료로 구성되며 이를 일정량의 물과 배합하여 양생시킨다. CLSM 조성에 쓰인 시멘트는 국내 A사의 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

CLSM 배합에 사용하는 토사는 주문진 표준사와 화강풍화토를 선정하였으며 화강풍화토는 대전광역시 관저동에서 일정깊이의 표토를 제거한 뒤 완전풍화된 상태의 토사를 채취하였고 입도분석결과 SW로 판정되었으며 이들의 물성시험결과는 표 1 및 표 2와 같다. 플라이애쉬는 하동화력발전소에서 생산되어 상용으로 정제되어진 것으로 KS L 5405 규정을 만족하였으며 물성시험결과는 표 3과 같다.

표 1. 주문진 표준사 기본 물성치

비중 ( $G_s$ )	입도분포	300 $\mu m$ 통과분	투수계수 (k, cm/sec)	통일 분류법
2.6	300~600 $\mu m$	6 %이하	$3 \sim 4 \times 10^{-3}$	SM

표 2. CLSM 배합에 사용된 화강풍화토의 토질 특성

구분	$G_s$	$r_{dmax}$ ( $KN/m^3$ )	OMC (%)	$C_c$	$C_u$	#200체 통과량(%)	C (kPa)	$\phi$ (deg)	PI	통일 분류법
화강풍화토	2.66	18.35	10.1	1.1	7.1	9.15	79.5	38.9	N.P	SW

표 3. 플라이애쉬의 물성시험결과

구분	SiO <sub>2</sub> (%)	수분 (%)	강열감량 (%)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도		Flow값 (%)	활성도 %		비고
					45 μm 잔분(%)	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)		재령 28일	재령 91일	
Fine-II 기준치	45 이상	1.0이하	5.0이하	1.95 이상	40이하	3000 이상	95이상	80 이상	90 이상	KSL 5405 규정값
시험결과	53.4	0.1	3.8	2.3	14.0	3830	102	93	93	

3. 시험결과

3.1 예비시험

3.1.1 유동성 시험 결과

CLSM 배합비를 도출하기 위해 물:플라이애쉬 비를 1:1로 고정하고 토사량을 늘리며 고유동성(확산직경 20 cm 이상)을 확보할 수 있는 배합비를 선정하였다. 국내 유동성시험 규격이 현실점에서 수립되어 있지 않아 유동성 확인을 위해 미국 규격 ASTM D 6103과 일본규격 JHS A 313을 따라서 유동성 시험을 실시하였으며 각 규격은 표 4와 같다.

입도분포가 300-600 μm으로 미세립분을 거의 포함하지 않은 표준사는 흙 입자의 공극이 커서 적은 양의 물과 고화제 배합비율에서 고유동성 범위를 보였다. 반면, #200 통과량이 약 10% 포함된 화강풍화토는 미세립분의 영향으로 인하여 표준사에 비해 물과 고화제의 배합비율이 각각 7.9% 높을 때 고유동성범위를 보였다. 고화제인 플라이애쉬 함유비를 고정한 상태에서 포틀랜드 시멘트량을 2.5-7% 범위에서 0.5%씩 증가시키며 총 10가지의 배합비를 설정하였다. 설정된 표준

사 재료의 배합비는 표 5, 화강풍화토 재료의 경우 표 6과 같다.

유동성 시험결과 시멘트 배합비를 달리한 각 10가지 배합 모두에서 ASTM D 6103과 JHS A 313 규격에서 모두 고유동성으로 정한 플로우(flow)값 20-30 cm 범위를 만족하였다. 시험 값은 전체적으로 표준사CLSM에 비해 화강풍화토 CLSM이 작은 플로우 값 즉, 유동반경이 작았다.

3.1.2 압축강도시험 결과

유동성시험을 거친 각 10가지 배합과 KS F 2403에 따라 직경 100, 높이 200 mm인 원주형공시체를 제작하였다. 압축강도는 유동성 뒷채움재의 타설후 기능성을 판단하는 가장 기초적인 판단지수가 됨으로 KS F 2405에 따라 재령 28일 후 압축강도시험을 수행하였다.

압축강도시험 결과 시멘트 함유비가 증가할수록 강도가 증가하였으며 그 값은 표준사CLSM과 화강풍화토CLSM에서 큰 차이를 보이지는 않았다. 두 가지 토사재료의 압축강도가 같은 시멘트 비율에서 거의 비슷한 강도를 보였다. ACI Committee 299(ACI, 1994)에서 CLSM을 굴착가능성에 따라 일축압축강도를 구분한 기준인 인력굴착(7 kgf/cm<sup>2</sup>이하), 장비굴착(7-21 kgf/cm<sup>2</sup>), 비굴착(21 kgf/cm<sup>2</sup>이상)에 해당하는 배합비 판정을 위하여 앞서 분류한 10가지 배합비의 실험 결과값으로부터 '시멘트 함유비-압축강도' 상관관계를 수립하였다. 각 10가지 공시체의 시멘트 함유비 증가에 따른 압축강도 변화의 상관관계는 주문진표준사CLSM의 경우 그림 9와 같고 화강풍화토CLSM의 경우는 그림 10과 같다. 소정의 고유동성을 확보하도록 배합설계된 주문진표준사 및 화강풍화토를 사용한 CLSM의 10가지 배합에서 모두 인력굴착과 기

표 4. 유동성 확인을 위한 시험방법

구분		적용 기준	
기준	규격	ASTM D 6103	JHS A 313
	몰드 치수	φ 7.62 cm×H 15.24 cm	φ 8cm×H 8cm
흐름값	저 유동성	15.24 cm 이하	15 cm 이하
	중간 유동성	15.24 - 20 cm	15 - 20 cm
	고 유동성	20 cm 이상	20 cm 이상

표 5. 표준사 CLSM 예비시험 배합비와 유동성 및 강도, 강성 결과

배합번호	배합비 (%)				플로우 값 (mm)		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (MPa)
	시멘트	플라이애쉬	물	표준사	ASTM D 6103	JHS A 313		
# 1	2.5	15.7	18.2	63.6	286	257	3.42	1766.5
# 2	3.0	15.2	18.2	63.6	295	256	4.30	2292.3
# 3	3.5	14.7	18.2	63.6	288	268	4.49	2628.4
# 4	4.0	14.2	18.2	63.6	289	256	5.10	3008.8
# 5	4.5	13.7	18.2	63.6	290	265	8.33	3921.5
# 6	5.0	13.2	18.2	63.6	285	259	7.12	3554.9
# 7	5.5	12.7	18.2	63.6	280	265	8.60	4036.5
# 8	6.0	12.2	18.2	63.6	291	254	11.64	4294.8
# 9	6.5	11.7	18.2	63.6	284	267	14.98	5062.4
# 10	7.0	11.2	18.2	63.6	274	250	12.48	5724.7

표 6. 화강풍화토 CLSM 예비시험 배합비와 유동성 및 강도, 강성 결과

배합번호	배합비 (%)				플로우 값 (mm)		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (MPa)
	시멘트	플라이애쉬	물	화강토	ASTM D 6103	JHS A 313		
# 1	2.5	23.6	26.1	47.8	273	237	3.42	985.9
# 2	3.0	23.1	26.1	47.8	266	230	4.77	1354.8
# 3	3.5	22.6	26.1	47.8	268	232	5.65	1359.9
# 4	4.0	22.1	26.1	47.8	282	239	6.07	1414.1
# 5	4.5	21.6	26.1	47.8	255	234	5.86	1601.7
# 6	5.0	21.1	26.1	47.8	268	242	8.02	1673.9
# 7	5.5	20.6	26.1	47.8	268	238	8.47	1936.7
# 8	6.0	19.6	26.1	47.8	259	228	7.64	2202.8
# 9	6.5	19.1	26.1	47.8	252	231	9.63	2486.3
# 10	7.0	18.6	26.1	47.8	238	211	12.85	2578.5

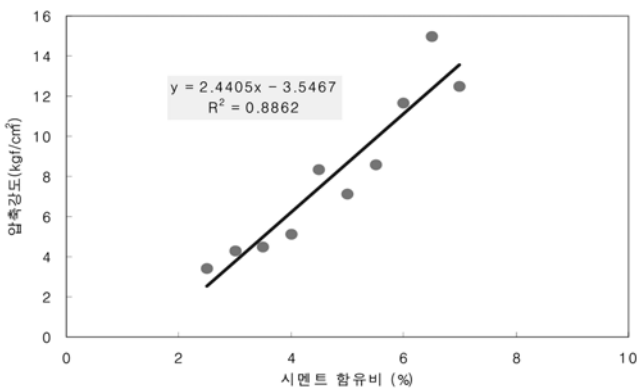


그림 9. 표준사CLSM의 시멘트 함유비 증가에 따른 압축강도 상관도

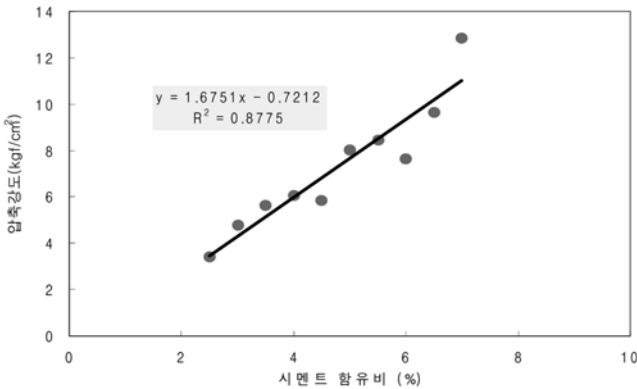


그림 10. 화강풍화토CLSM의 시멘트 함유비 증가에 따른 압축강도 상관도

계굴착이 가능한 것으로 판단되었으나 비굴착(일축압축강도 21 kgf/cm<sup>2</sup>이상)이 될 정도의 고강도를 발현시키지는 않는 것으로 확인되었다. 따라서 현장유용도인 화강풍화토를 사용하여 현장상황과 여건에 맞추어 배합비를 선택, 유동성을 확보 하면서 CLSM을 제작하여 시공할 수 있을 것으로 판단된다.

두 가지 CLSM의 상관도에서 각각 소정의 압축강도 발현을 위해 필요한 시멘트 함유비를 결정할 수 있는 식(1)과 식(2)를 도출하였다. y를 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>), x를 시멘트 함유비

(%)라고 할 때 본 연구에서 설정된 배합비하에서의 표준사 CLSM 압축강도(y)와 시멘트 함유비(x)의 관계식은 다음과 같다.

$$y = 2.4405x - 3.5467 \quad (4)$$

또한, 화강풍화토CLSM 압축강도와 시멘트 함유비의 관계식은 다음과 같다.

$$y = 1.6751x - 0.7217 \quad (5)$$

두 식의 R<sup>2</sup> 값은 각각 0.8862와 0.8775로 상관성이 높게 나타났으므로 이 식을 이용하여 소정의 고유동성 CLSM의 압축강도가 발현되기 위한 시멘트 함유비 결정에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 3.1.3 자유단 공진주시험 결과

자유단 공진주시험(FF/RC)을 실시하여 표준사CLSM과 화강풍화토CLSM의 시멘트 함유비 증가에 따른 동탄성계수 변화를 분석하였다. 시험결과는 그림 11과 같이 시멘트 함유비가 증가할수록 동탄성계수( $E_{FF-RC}$ )가 비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 같은 시멘트 함유비에서 각 토사재료의 공시체들이 비슷한 압축강도를 보였던 것과는 다르

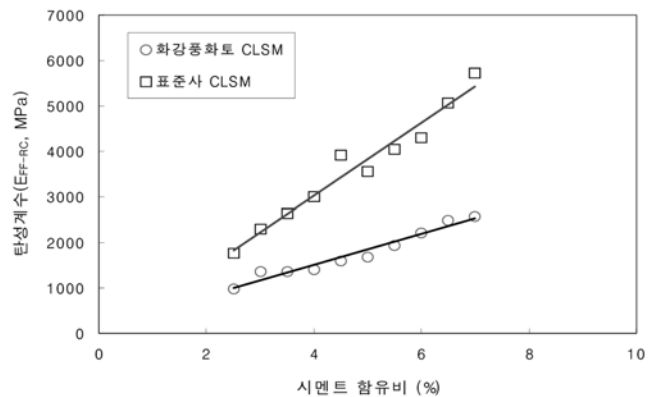


그림 11. CLSM의 시멘트 함유비 증가에 따른 동탄성계수 변화

계 동탄성계수의 값은 같은 시멘트 함유비에서 표준사-CLSM 공시체가 화강풍화토-CLSM 공시체에 비해 약 2배 이상 큰 탄성계수 값을 보였다.

시험결과 동일한 시멘트 함유비에서 비슷한 압축강도를 얻을 수 있더라도 쓰이는 토사재료의 종류와 배합비율에 따라 탄성계수가 상이할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 뒷채움토 또는 도로성토재 와 같이 설계목적상 침하 또는 변형이 최소화되어야 하는 시공장소에서는 강도보다는 강성이 우선되어야 하므로 CLSM의 이와 같은 특성을 반드시 고려하여야 할 것으로 보인다.

### 3.2 공내재하시험 및 동적평판재하시험

제작된 토조내에 배합설계비에 따라 배합된 CLSM를 포설하고 소정기간 양생시킨 후 공내재하시험(PMT)과 동적평판재하시험(LDWT)을 실시하여 유동성 뒷채움재의 재령일, 토사종류, 시멘트 함유비에 따른 역학적 특성을 비교 평가하였다. 공내재하시험은 구속압의 영향을 배제하고 무기압상태에서의 변형계수만을 측정하였다. 본실험을 위한 CLSM 배합시 예비실험을 통해 획득한 재령 28일 기준 압축강도-시멘트 함유비 관계식(식(4)와 식(5))을 이용하여 시멘트 함유비를 계산하였으며 굴착가능성을 고려(인력굴착, 장비굴착, 비굴착)하여 이에 해당하는 목표강도를 설정하고 배합비를 표 7과 같이 설정하였다. 각 배합비에 해당하는 대형 공시체를 토조내에 제작하고 재령 3일과 재령 7일에 공내재하시험(PMT)과 동적

평판재하시험(LDWT)을 각각 실시하였다.

#### 3.2.1 공내재하시험 결과

공내재하시험에서 획득된 데이터를 처리하고 그 결과인 초기변형계수( $E_0$ )과 재하-재제하 변형계수( $E_R$ )를 토사, 재령, 배합비별로 구분하여 표 8에 비교, 정리하였다.

표준사 CLSM의 경우 재령3일에서 인력굴착이나 기계굴착에 해당하는 배합시 변형계수 측정결과값(초기탄성계수( $E_0$ ) 및 재제하 탄성계수( $E_R$ ))이 유사하였다. 즉, 목표강도에서의 차이(각 7, 14 kgf/cm<sup>2</sup>)에도 불구하고 변형계수는 초기 재령(3일)에서 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 재하-재제하변형계수( $E_R$ )는 인력굴착의 경우 재령 3, 7일에서 유사한 값을 보였다. 초기 변형계수( $E_0$ )보다 재하-재제하변형계수( $E_R$ )의 신뢰도가 높은 것을 고려할 때 인력굴착으로 낮게 책정된 강도위주로 배합설계할 경우 실 시공시에 재령3~7일사이에서는 큰 강성의 변화가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 화강풍화토의 인력굴착 및 기계굴착 초기재령(3, 7일)에서도 확인되었다. 반면, 장비굴착에 해당하는 배합시 변형계수 측정결과값은 재령3일에 비해 재령7일에서 초기탄성계수( $E_0$ ) 및 재제하 탄성계수( $E_R$ )가 약 4배, 비굴착 배합은 약 2.3배 정도 급격히 증가 하는 경향을 확인할 수 있었다. 이와 같은 경향은 비굴착의 경우에서도 유사하게 확인되었다.

화강풍화토-CLSM의 경우, 대체적으로 재령 3~7일에서 목표강도를 고려한 배합시 전체적인 변형계수의 발현특성은 주문표준사를 사용한 경우와 유사하였으나 FF/RC시험에서와

표 7. CLSM의 굴착가능성에 따른 배합비

구분		목표강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	배합비 (%)			
			시멘트	플라이애쉬	물	토사
표준사 CLSM	인력굴착	7	4.3	13.9	18.2	63.6
	장비굴착	14	7.2	11	18.2	63.6
	비굴착	21	10.1	8.1	18.2	63.6
화강풍화토 CLSM	인력굴착	7	4.6	21.5	26.1	47.8
	장비굴착	14	8.8	17.3	26.1	47.8
	비굴착	21	12.9	13.2	26.1	47.8

표 8. 동적 평판재하시험 결과값  $E_{vd}$ 와 공내재하시험 결과값  $E_0, E_R$

종류	재령일	배합구분	$E_{vd}$ (MPa)	$E_0$ (kPa)	$E_R$ (kPa)
표준사 CLSM	3일	인력굴착	11.5	755.8	6975.4
		장비굴착	10.5	851.5	7177.2
		비굴착	21.2	1397.1	13174.1
	7일	인력굴착	12.4	1334.1	6786
		장비굴착	33.5	3356.4	29578.9
		비굴착	35.4	4560.8	30759.4
화강풍화토 CLSM	3일	인력굴착	6.4	376.5	4111.1
		장비굴착	8.6	416.6	4692.9
		비굴착	15.2	764.1	8029
	7일	인력굴착	7.7	583.8	4231.4
		장비굴착	16.2	1077	9876.8
		비굴착	24.6	1852.9	17027.4

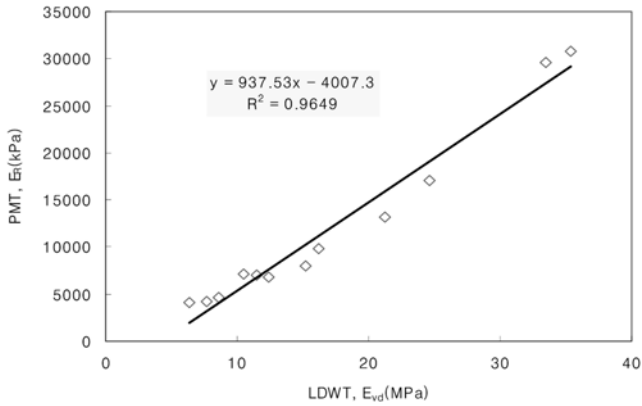


그림 12. PMT-LDWT 결과값의 상관도

마찬가지로 현장유용토인 화강풍화토를 사용하였을 때의 강성이 주문진표준사를 사용하였을 경우에 비하여 약 55~65% 정도밖에 발견되지 않았다.

### 3.2.2 동적 평판재하시험 결과

본 시험에서는 10 kg짜리 추를 낙하고 73 cm에서 낙하시켜 타격시키며 이때 측정되는 침하량 및 재하관하부에 발생하는 압축응력을 이용, 식(3)에 의해 탄성계수( $E_{vd}$ )를 환산하였다.

목표강도별로 구분하여 배합된 고결체에 대하여 실시한 동적 평판재하시험의 결과 값의 토사, 재령 및 배합구분별 동적평판재하시험 결과값( $E_{vd}$ )은 표 8과 같이 측정되었다. 공내재하시험 결과와 마찬가지로 초기재령(3일)에서는 인력굴착과 장비굴착(목표강도 각 7, 14 kgf/cm<sup>2</sup>) 사이에  $E_{vd}$ 값의 큰 차이가 없었으며 재령 7일에서는 인력굴착과 장비굴착사이에 약 2배 이상의 큰 차이가 발생하였다. 또한 인력굴착의 경우 재령 3~7일 사이에서는  $E_{vd}$ 값의 변화가 거의 발견되지 않았다. 따라서 목표강도를 인력굴착 위주로 배합하여 설계하고 이를 현장에 타설하였을 경우, 초기 3~7일 재령사이에서는 강성의 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

동적평판재하시험에서 구한  $E_{vd}$ 와 공내재하시험에서 구한  $E_R$  값의 상관관계를 표현하면 그림 12와 같이  $R^2$ 가 0.9649로 높게 나타나는 상관그래프를 얻을 수 있었다. 상관도를 이용하여 어느 한 실험을 통해 다른 실험값을 유추할 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 유동성 뒷채움재(CLSM)의 배합 토사재료로서 국내 현장에서 흔히 발생하는 화강풍화토의 적용가능성을 일축압축강도, 공내재하시험, 동적평판재하시험 및 자유단 공진주시험 등을 통하여 살펴보았다. 화강풍화토를 사용한 CLSM의 고유동성을 확보할 수 있는 배합비를 예비시험을 통하여 설정하였고 목표강도 위주로 구분하여 배합한후 토사와 재령에 따라 발견되는 CLSM의 강성발현특성을 분석하였

다. 각 시험결과로부터 아래와 같은 결론을 구할 수 있었다.

- 1) 화강풍화토는 미세립분의 영향으로 표준사에 비해 물과 고화제의 배합비율이 각각 7.9% 높을 때 고유동성 범위를 보였다. 반면, 입도분포가 300-600  $\mu$ m으로 미세립분을 거의 포함하지 않은 표준사는 흙 입자의 공극이 커서 적은 양의 물과 고화제 배합비율에서 고유동성 범위를 보였다.
- 2) 압축강도시험 결과를 바탕으로 '시멘트 함유비-압축강도'의 상관식을 세워 소정의 압축강도가 발현 가능할 것으로 예상되는 시멘트 함유비를 도출하였다. 이 식으로 각 토사재료에 대한 배합비를 최종 결정할 수 있다. 동일 시멘트 함유비에서 비슷한 압축강도를 보였던 것과는 다르게 동탄성계수의 값은 동일 시멘트 함유비에서 표준사 CLSM 공시체가 화강풍화토CLSM 공시체에 비해 약 2배 이상의 높은 탄성계수 값을 보였다.
- 3) 인력굴착으로 낮게 책정된 목표강도(7 kgf/cm<sup>2</sup>)위주로 배합설계할 경우 실 시공시에 재령3~7일사이에서는 큰 강성의 변화가 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 고유동성을 확보한 CLSM에 대하여 동적평판재하시험에서 구한  $E_{vd}$ 와 공내재하시험에서 구한  $E_R$  값의 신뢰도 높은 상관관계식을 구하였으며 어느 한 실험을 통해 다른 실험값을 유추할 수 있도록 하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)(스마트하이웨이 사업단)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박재현, 이관호, 조재운, 성상규, 이관호 (2003) 유동성 채움재를 이용한 지하 매설관의 변형특성 연구. **한국도로포장공학회 논문집**, 한국도로포장공학회, 제5권, 제2호, pp. 25-35.
- 원종필, 신유길 (2000) 다량의 플라이애쉬를 사용한 저강도 고유동 충전재의 내구특성에 관한 연구. **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제12권, 제1호, pp. 113-122.
- 이관호, 조재운, 신현무, 김남호 (2001) 방식사를 이용한 유동성 채움재의 최적배합비설계 및 다짐특성. **한국도로학회 학술발표회 논문집**, 한국도로학회, 제3권, 제1호, pp.1 89-193.
- 임유진, 뉴엔티엔하이 (2004) 공내재하시험에 의한 포장하부기초 강성도 평가. **한국도로학회논문집**, 한국도로학회, 제6권, 제2호, pp. 25-36.
- American Concrete Institute (1994) *Controlled low strength materials*. Report by ACI Committee 229, Concrete International, July, pp. 55-64.

- © 논문접수일 : 09년 05월 20일
- © 심사의뢰일 : 09년 05월 21일
- © 심사완료일 : 09년 05월 28일