



# 도로하부 성토재료로서의 유동성 뒷채움토 적용을 위한 기초시험

## Experiments for Applying CLSM to Pavement Foundations

임유진\*

Lim, Yujin

서창범\*\*

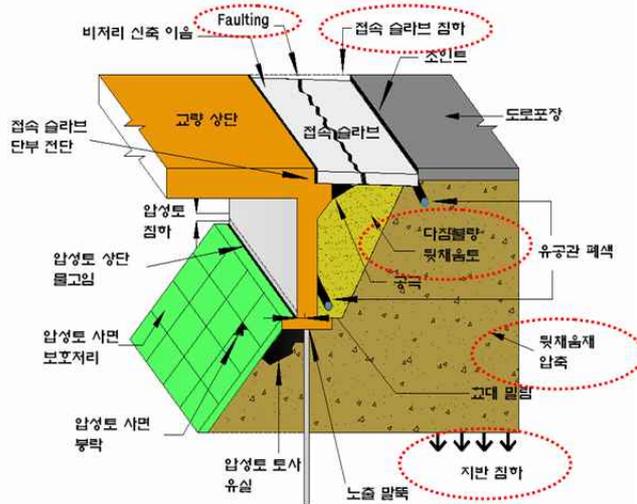
Seo, Chang Beom

박재범\*\*\*

Park, Jae Beom

### 1. 서론

포장하부층을 구성하는 비처리(unbound) 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 주행중 차량의 승차감과 주행성이 감소되는 주요 원인이 되고 있다. 교대 뒷채움부에서 단차가 발생하는 주요원인은 <그림 1>과 같이 정리해 볼 수 있다.



<그림 1> 교대 뒷채움부에서 발생하는 단차의 발생원인

본 연구에서는 현재 국내 대부분의 도로현장에서 하부기초의 다짐 재료로 사용되고 있는 화강풍화토와 이를 대체할 수 있도록 개발중인 유동성 고하다짐재(CLSM)의 물리적 및 공학적 특성을 비교 검토하였다. 특히, 도로 하부기초에서 발생하는 변형이 상부포장층에서의 처짐과 단차를 발생시키는 원인이 된다고 보고 하부기초에 포설시를 가정하여 임의로 주어진 환경하에서 각 재료의 특성시험을 실시하였다.

\* 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수 · 042-520-5402 (E-mail: yujin@pcu.ac.kr)  
 \*\* 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 대학원 석사과정 · 042-520-5855  
 \*\*\* 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 대학원 석사과정 · 042-520-5855



## 2. 시험 방법

### 2.1 시험재료의 특성

시험에 사용된 각 재료의 물성을 파악하기 위하여 실내물성시험을 실시하였다. CLSM 재료의 구성은 미소량의 일반 포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬(fly ash) 및 현장발생토 등의 토사 또는 이에 준하는 대체재로 구성되며 이를 일정량의 물과 배합하여 사용한다. CLSM 구성에 사용된 시멘트는 시중에서 구할 수 있는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

CLSM에 사용되는 토사는 주문진 표준사와 화강풍화토를 선정하였으며 이중 화강풍화토는 대전광역시 관저동 및 원신홍동에서 일정깊이의 표토를 제거한 뒤 채취하였고 입도분석결과 각각 SM으로 판정되었으며 이들의 물성시험결과는 표 1. 및 표 2.와 같다. 특히, 원신홍동 화강풍화토의 PI지수가 노상에서 요구되는 소요조건 보다 높은 재료를 선정하여 이를 CLSM으로 사용할 때 PI지수가 높은 흙재료가 포장하부구조의 대체재로서 필요충분조건을 갖출 수 있는지를 조사하였다. 플라이애쉬는 하동화력에서 생산된 제품을 사용하였으며 정제공정을 거치지 않은 원재료의 화학적 구성비는 표 3.과 같고 이를 정제한 시험재료의 물성시험결과는 표 4.와 같다.

〈표 1〉 CLSM 구성에 사용된 주문진 표준사의 재료 특성

비 중 (Gs)	입도분포	300 $\mu$ m 통과분	투수계수 (k, cm/sec)	통일분류
2.6	300 ~ 600 $\mu$ m	6% 이하	$3 \sim 4 \times 10^{-3}$	SM

〈표 2〉 CLSM 구성에 사용된 화강풍화토의 토질 특성

구분	Gs	$r_{dmax}$ ( $KN/m^3$ )	OMC (%)	Cc	Cu	#200체 통과량(%)	C (kPa)	$\phi$ (deg)	PI	통일 분류법
화강풍화토1	2.66	20.11	10.5	1.2	6	2	79.5	38.9	N,P	SW
화강풍화토2	2.61	18.24	12.8	1	9	10.5	-	-	15	SC
입도조정채석	2.65	20.96	7.6	-	-	-	-	-	N,P	-

〈표 3〉 정제공정을 거치지 않은 플라이애쉬의 화학적 구성비

구분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig-Loss
Fly ash	60.52	25.72	4.31	3.24	0.98	0.15	2.91

〈표 4〉 정제공정을 거친 플라이애쉬의 물성시험결과

구분	SiO <sub>2</sub> %	수분 %	강열 감량 %	밀도 g/cm <sup>3</sup>	분말도		Flow값 %	활성도 %		비고
					45 $\mu$ m 잔분 %	비표면적 cm <sup>2</sup> /g 브레인 방법		재령 28일	재령 91일	
Fine-II기준치	45 이상	1.0이하	5.0이하	1.95 이상	40이하	3000 이상	95이상	80 이상	90 이상	KS L 5405 규정값
시험결과	53.4	0.1	3.8	2.3	14.0	3830	102	93	93	

### 2.2 시험 방법 및 시험 조건

시멘트 함유량 등 구성재료의 배합비 차이에 따른 CLSM재료의 거동특성을 분석하기 위하여 표 5.와 같은 시험방법 및 시험조건을 설정하였으며 각 시험법으로부터 획득할 시험값을 함께 정리하였다. CLSM재료의 재료구성 차이에



의한 강성변화를 평가하기 위하여 무구속 자유단 공진주(FFRC)시험, 동평판재하시험 및 공내재하시험 등을 실시하였다. 또한 재령에 따른 강도변화를 조사하기 위하여 일축압축강도시험을 실시하였다. CLSM을 시멘트경화에 의한 콘크리트 재료로 평가할 것인지 또는 소일시멘트(soil cement)와 같이 cementation 특성이 강화된 점성이 큰 흙재료로 평가할 지의 여부는 현재까지 결정된 바 없다. 다만 고화된 재료의 특성상 구속압의 영향은 크지 않을 것으로 판단하여 구속압 효과는 시험고려요소에서 제외하였다. 실내 시험의 개략 시험도는 <그림 2> 및 <그림 3>과 같다. <표 6>과 같이 모든 CLSM 재료는 주재인 흙재료(화강풍화토/주문진표준사)+플라이애쉬+시멘트의 구성으로 이루어졌으며 토사(39%)와 물(28%)의 비율을 고정한 상태에서 플라이애쉬와 포틀랜드 시멘트의 비율을 증감시키면서 전체 배합비를 조정하였다. CLSM 시험용 시편은 직경 10cm, 높이 20cm의 몰드를 이용하여 배합후 성형, 제작하였으며 공진시험용 시편은 직경 5cm, 높이 10cm로 다짐, 제작하였다.

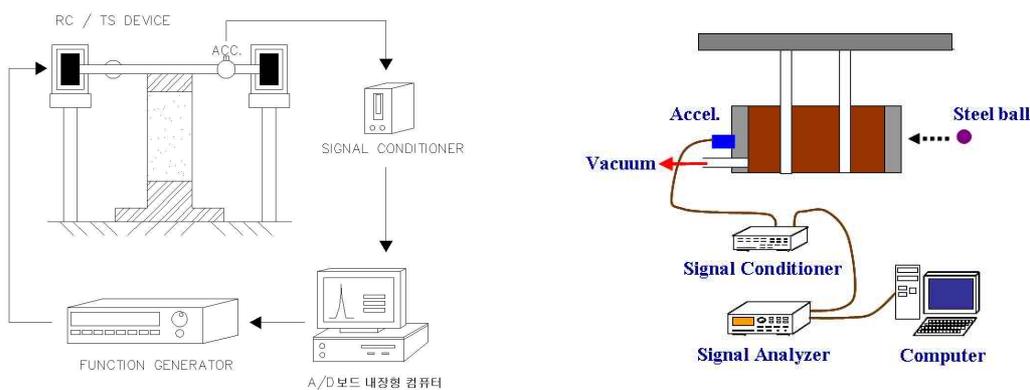
<표 5> 시험재료에 따른 소요 시험방법 및 시험조건

시험재료		적용 시험방법 및 취득 데이터				
시험대상 재료명	재료구성 특성	FF/RC	RC/TS	동평판재하시험	공내재하시험(PMT)	강도시험
화강풍화토 I	PI 6이하	N/A	E, G	동적탄성계수 (Evd)	초기탄성계수 (Eo) 재재하탄성계수 (Er) 한계압력 (PL)	일축압축강도 (fck)
화강풍화토 II	PI 6이상	N/A	E, G			
CLSM I	Cement 2%	E	N/A			
CLSM II	Cement 3%	E	N/A			
CLSM III	Cement 4%	E	N/A			

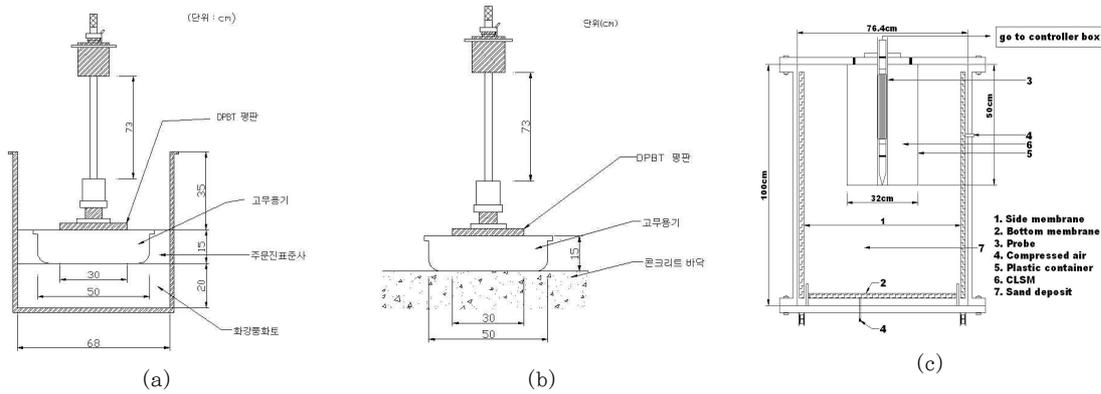
N, B) E = 탄성계수, G = 전단탄성계수, PI = 소성지수

<표 6> CLSM 시험재료의 구성 배합비

배합 분류	배합 재료 무게비 (%)			
	Fly Ash	일반시멘트	토사	물
시멘트2% 함유 CLSM	31	2	39	28
시멘트3% 함유 CLSM	30	3	39	28
시멘트4% 함유 CLSM	29	4	39	28



<그림 2> 실내 공진시험의 개요도: (a) RC/TS 시험, (b) 자유단 공진주(FF/RC) 시험



〈그림 3〉 실내 시험의 개략도: (a)토조내 DPBT 시험, (b)바닥판 직타 DPBT 시험, (c)공내재하시험

동적평판재하시험(DPBT) 시험은 〈그림 3〉과 같이 화강풍화토로 다짐된 성토체지반 위에 CLSM을 타설하였을 경우 〈그림 3〉-(a)와 강성의 원지반 절토지반을 모사한 콘크리트체 위에 CLSM을 타설하였을 경우〈그림 3〉-(b)로 각각 가정하여 타격시험을 실시하고 동적탄성계수 값  $E_{vd}$ 를 구하였다. 이때 〈그림 3〉-(a)의 토조 내 하부화강풍화토는 E 다짐에너지에 준하는 다짐기구를 제작하여 다짐을 실시하였다. 또한 CLSM은 표 6.의 배합비에 따라 조성하였으며 화강풍화토 I에 대하여서만 타격시험을 실시하였다.

공내재하시험(PMT)은 〈그림 3〉-(c)와 같이 플라스틱 용기 내에 배합비율과 조성재료를 달리한 CLSM을 타설한 후 용기 중심에 기 설치되었던 플라스틱봉을 제거하여 천공장을 확보한 후, 재령 7일에 〈그림 2〉와 같은 가압형 토조내에 설치하여 일정 구속압 하에서 공내재하시험을 실시하는 방식을 취하였다. 이때 가압형 토조에 가한 구속압은 구속압의 효과를 보기 위한 것이 아니고 현장 타설시 포장하부층의 수평응력( $\sigma_{ho}$ )을 재현하기 위함이다. 또한 자유단 공진주시험(FF/RC)은 재령 각3일, 7일에 탈형한 후 가진시의 공진주파수를 이용하여 탄성계수를 구하였으며 동일한 시편을 이용하여 각 재령에서 일축압축강도(UCS)시험을 실시하였다. 화강풍화토 및 입도조정쇄석으로 만들어진 시편은 '0' 구속압 상태에서 시험이 불가능하여 RC/TS 시험을 이용하여 탄성계수를 구하였다.

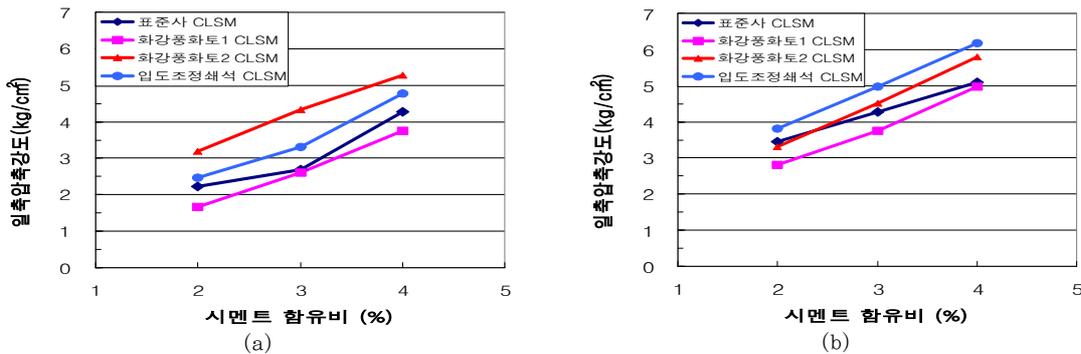
### 3. 시험결과의 분석

CLSM 구성비 중 초기시험의 중요성을 감안하여 포틀랜드 시멘트 함유비의 증가에 따른 일축압축강도 및 탄성계수의 변화를 추적, 조사하였다(〈그림 4〉〈그림 5〉〈표 7〉). CLSM을 조성하는데 사용한 포틀랜드 시멘트의 함유비가 증가함에 따라 일축압축강도 및 탄성계수의 증가가 예상한 바와 같이 확인되었다. 그러나, 재령 3일에서 통일분류법상 SC로 판명된 화강풍화토2의 일축압축강도 및 탄성계수가 더 크게 발생되었음을 발견하였으며 발생크기를 비교하면 재령 3일에서는 화강풍화토 2, 입도조정쇄석, 표준사, 화강풍화토 1 CLSM의 순서로 압축강도가 발생되었으며 재령 7일에서는 입도조정쇄석, 화강풍화토 2, 표준사, 화강풍화토 1 CLSM의 순서로 압축강도가 발생되었다. 즉, 장기재령으로 갈수록 입상재료로 구성된 CLSM의 강도발현이 더 커지고 점토성분이 많은 화강풍화토 2의 강도발현율이 낮아지는 경향을 확인하였다. 이는 〈그림 6〉에서 확인할 수 있다. 즉, 초기재령에서는 세립성 흙으로 구성된 CLSM의 강도가 빠르게 획득되는 것으로 보이나 장기재령에서는 입상재료로 만들어진 CLSM의 강도가 더 클 수 있음을 뜻한다.

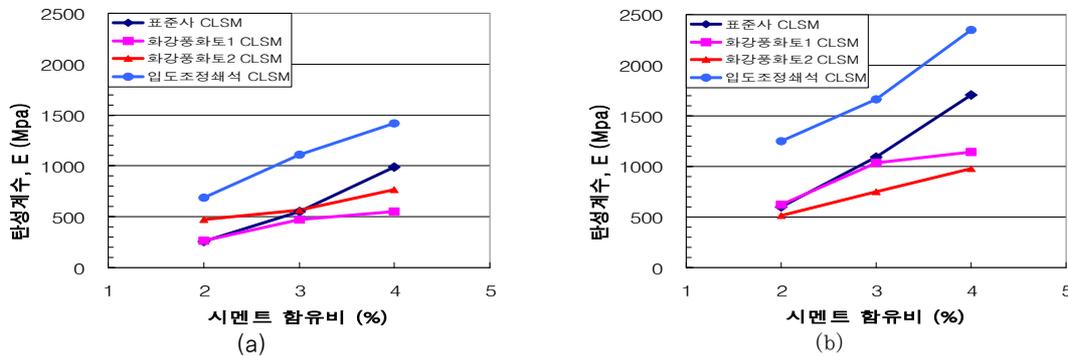
CLSM재료의 재령에 따른 탄성계수를 비교한 결과, 시멘트 함유비에 상관없이 모든 재령에 걸쳐 입도조정쇄석 CLSM



의 탄성계수가 타 재료에 비하여 확연히 크게 발생되었음을 확인하였다. 이는 쇄석자체의 강성이 타 흙재료에 비하여 큰 때문으로 판단된다. 또한 초기 재령(3일)에서는 화강풍화토 2의 CLSM 탄성계수가 화강풍화토 1보다 더 크게 발생되었으나 재령 7일에서는 역전되었음을 확인하였다. 아울러, 시멘트 함유비 증가에 따른 탄성계수의 증가경향을 조사한 결과 입상재료를 만들어진 CLSM의 탄성계수 증가율(입도조정쇄석 및 표준사 CLSM)이 세립성의 화강풍화토 흙재료로 구성된 CLSM보다 더 빠름을 확인하였다(그림 6).



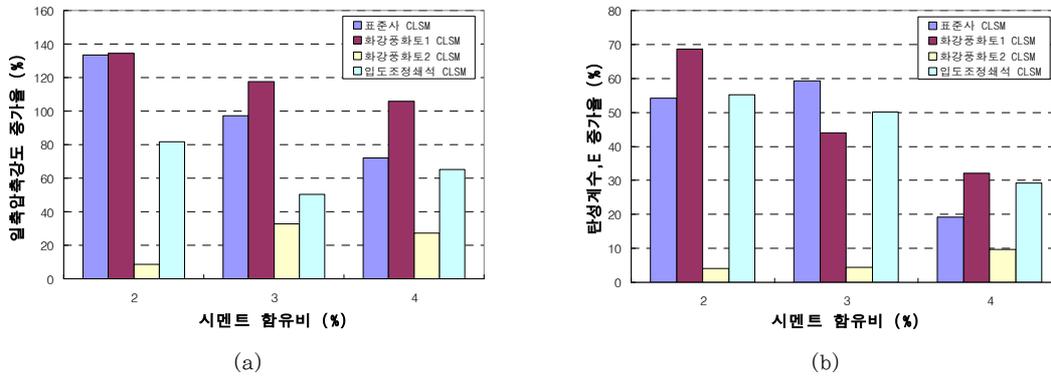
〈그림 4〉 시멘트 함유비 증가에 따른 CLSM의 일축압축강도 변화: (a) 재령3일, (b)재령 7일



〈그림 5〉 시멘트 함유비 증가에 따른 CLSM의 탄성계수 변화: (a) 재령3일, (b)재령 7일

〈표 7〉 시멘트 함유량과 토사종류에 따른 CLSM의 강도 및 강성 시험결과

배합 분류	일축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		탄성계수 (MPa)	
	재령 3일	재령 7일	재령 3일	재령 7일
시멘트2% + 표준사	2.23	3.44	256.8	599.8
시멘트3% + 표준사	2.68	4.27	552.7	1089.8
시멘트4% + 표준사	4.27	5.09	989.8	1704.2
시멘트2% + 화강풍화토1	1.66	2.80	265.8	623.6
시멘트3% + 화강풍화토1	2.61	3.76	474.9	1032.7
시멘트4% + 화강풍화토1	3.76	4.97	554.5	1140.8
시멘트2% + 화강풍화토2	3.18	3.31	474.7	515.5
시멘트3% + 화강풍화토2	4.33	4.52	565.9	752.2
시멘트4% + 화강풍화토2	5.28	5.79	767.7	977.5
시멘트2% + 입도조정쇄석	2.46	3.82	688.0	1250.4
시멘트3% + 입도조정쇄석	3.31	4.97	1108.2	1665.5
시멘트4% + 입도조정쇄석	4.78	6.18	1421.6	2350.5



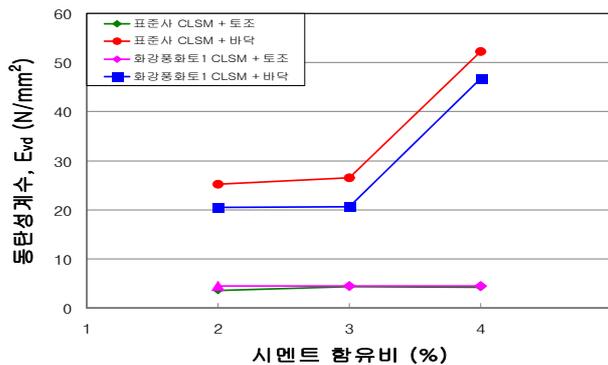
〈그림 6〉 시멘트 함유비 증가에 따른 재령 3일 대비 재령 7일 일축압축강도 및 탄성계수의 증가율 비교

〈그림 6〉과 같이 재령 3일 대비 재령 7일에서의 시멘트 함유비 증가에 따른 일축압축강도 및 탄성계수의 변화율을 살펴보면 시멘트 함유비 2 %에서는 표준사와 화강풍화토 1 CLSM의 증가율이 가장 컸으며 화강풍화토 2의 증가율이 가장 작았다. 반면, 시멘트 함유비 전대역에 걸쳐 표준사와 화강풍화토 1 CLSM의 일축압축강도와 탄성계수 증가율이 가장 큼을 알 수 있었다. 동적평판재하시험(DPBT)은 최소 3회 시험 후 평균값을 사용한다. 본 시험에서는 10 kgf짜리 추를 낙하고 73cm에서 낙하시켜 타격시키며 이때 측정되는 침하량 및 재하판하부에 발생하는 압축응력을 이용, 식 (1)에 의해 동적탄성계수(E<sub>vd</sub>)를 환산한다.

$$E_{vd} = 1.5r \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \quad (1)$$

여기서, r(mm) = 평판의 반지름, Δσ (Mpa)=평판에 10kg이 작용하면 0.1Mpa 사용, Δs(mm) = 침하량

동적평판재하시험(DPBT) 시험결과와 〈그림 7〉 및 〈표 8〉과 같은 시험결과를 얻었다. 〈그림 3〉에 설명한 바와 같이 화강풍화토로 다짐된 성토체지반 위에 CLSM을 타설하였을 경우〈그림 3〉-(a)에는 동적탄성계수의 시멘트 함유비 증가에 따른 탄성계수 변화가 크지 않았으나 강성의 원지반 절토지반을 모사한 콘크리트체 위에 CLSM을 타설하였을 경우〈그림 3〉-(b)에는 시멘트 함유비 증가에 따른 동적탄성계수의 증가가 확연하게 확인되었으며 특히, 시멘트 함유비 4%에서 두드러진 증가가 있었다. 따라서 현장에 타설된 CLSM의 동탄성계수는 시멘트 함유비의 변화에 대하여 큰 차이가 없을 것으로 판단되나 층상구조에 변화에 따른 상세한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.



〈그림 7〉 시멘트 함유비에 따른 동적탄성계수의 변화추이





표 9.는 시험에서 획득된 데이터를 이용하여 계산된 PMT 영향인자 계산을 위한 입력값이며 표 10.은 이로부터 계산된 PMT 영향인자이다.

〈표 9〉 PMT 영향인자 계산을 위한 입력값

	입 력 값 (kPa)					
	재령3일(시멘트 배합비)			재령 7일(시멘트 배합비)		
	2%	3%	4%	2%	3%	4%
E1	59763.12	79257.25	118466	32649.46	47350.57	49635.11
E2	14614.14	17215.18	10044.35	10616.55	25861.07	6713.598
ESEC	7182.904	8237.923	14877.91	3349.934	5955.406	5922.794
ESO	655.9058	807.4011	1049.741	783.1993	962.0664	1207.676
ES5	654.2891	803.7416	1041.51	779.8799	957.5179	1214.24

〈표 10〉 계산된 PMT 영향인자

	계 산 된 값					
	재령3일(시멘트 배합비)			재령 7일(시멘트 배합비)		
	2%	3%	4%	2%	3%	4%
K	27893.7	29004.3	6513.4	20822.6	29645.7	7999.8
ns	1.8576	1.6852	3.9648	1.0299	0.6537	2.0448
b	2.28E-04	2.05E-04	2.59E-04	2.94E-04	2.64E-04	2.67E-04
nr	-1.534E-03	-2.822E-03	-4.891E-03	-2.639E-03	-2.945E-03	3.368E-03
nc	0.142	4.480E-02	-5.302E-02	7.372E-02	4.432E-03	6.194E-02
EO(kPa)	737.86	677.13	1006.59	761.42	746.34	761.89
ER(kPa)	3743.63	3447.69	10521.19	4864.01	3604.46	5199.63
E(K, Ns, b, Nc, Nr)	7706.288	11384.680	20542.886	4576.933	9599.013	7130.057

#### 4. 결 어

본 연구에서는 현재 국내 대부분의 도로현장에서 하부기초의 다짐 재료로 사용되고 있는 화강풍화토와 이를 대체할 수 있도록 개발중인 유동성 고화다짐재(CLSM)의 물리적 및 공학적 특성을 다양한 실내시험을 통하여 비교 검토하고 분석하였으며 추후 지속적인 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2008년 '스마트하이웨이 사업단 핵심 1연구 분야 3세부과제(스마트 pavement 설계기술개발)'의 일환으로 연구 수행되었으며 해당 기관의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 권기철 (2003) “전체변형률 범위에서 변형특성 평가를 위한 공내재하시험 장치개발”, 한국지반공학회는논문집, 제19권, 제6호, 335-342
- 장덕순 (2003) “공내재하시험(PMT)을 이용한 도로포장체의 설계법 개발연구”, 석사학위논문, 배재대학교 대학원.
- 임유진, 누엔 티엔 하이, 장덕순(2004) “공내재하시험에 의한 포장하부기초 강성도 평가”, 한국도로학회 논문집, 제6권, 제2호, pp25-36
- Briaud, J.-L., Lytton, R. L. and Hung, J. T. (1983) "Obtaining Moduli from Cyclic Pressuremeter Tests", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 5, May 1983, pp. 657-665