한국지반신소재학회논문집 제20권 4호 2021년 12월 pp. 133 ~ 140
J. Korean Geosynthetics Society Vol.20 No.4 December 2021 pp. 133 ~ 140
DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2021.20.4.133
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

유동성 채움재의 조기 강도 및 강성 특성 평가를 위한 실험적 연구

Experimental Study on Evaluating Early-age Strength and Stiffness Characteristics of Controlled Low Strength Material

손동건[1], 정인업[2], 김동주[3], 변용훈[4]*
Dong Geon Son[1], In Up Jeong[2], Dong-Ju Kim[3], Yong-Hoon Byun[4]*

[1]*Undergraduate Student, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National Univ., 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea*
[2]*Undergraduate Student, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National Univ., 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea*
[3]*Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea*
[4]*Member, Assistant Professor, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National Univ., 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea*

ABSTRACT

There are few attempts to estimate the strength and stiffness of controlled low strength material (CLSM) using existing field-testing methods. The objective of this study is to evaluate the resilient modulus of CLSM by using the Light Weight Deflectometer (LWD) and investigate the relationships between the resilient modulus from LWD and the unconfined compressive strength (UCS) and secant modulus of elasticity from unconfined compressive test. Five CLSMs with different mix designs are used to evaluate the flowability and the stiffening of the CLSM in the flow and Vicat needle tests, respectively. To evaluate the early strength and stiffness characteristics, unconfined compressive tests are performed using the CLSM specimens cured for 1 and 7 days. LWD tests are carried out to estimate the resilient modulus of the CLSM specimens. The experimental results show that for the curing time of 1 day, the UCS and secant modulus of elasticity generally increase with the fast setting mortar content (FC). The CLSM specimen with the highest FC shows the significant increase in the UCS and secant modulus of elasticity along the curing time. Overall, the resilient modulus for the curing time of 1 day increases with the FC, while that for the curing time of 7days decreases with an increase in the FC. From the results, the linear relationships between the resilient modulus and UCS and secant modulus of elasticity are established.

요 지

기존 현장시험법을 이용한 유동성 채움재의 강도 및 강성 특성을 추정하는 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 LWD를 이용하여 CLSM에 대한 강성 특성을 평가하였으며, 일축압축강도시험에서 도출되는 일축압축강도와 할선탄성계수에 대한 상관성을 분석하였다. 5종류의 배합비로 조성된 CLSM시료의 유동성 및 경화특성을 평가하기 위해 플로우시험, 응결시간시험을 수행하였다. 조기 강도 및 강성 특성을 평가하기 위하여, 양생 1일 및 7일이 경과된 시료를 이용하여 일축압축강도시험을 수행하였다. CLSM시료의 회복탄성계수를 추정하기 위하여 LWD 시험도 수행되었다. 실험결과, 양생 1일된 시료에서는 초속경 모르타르의 비율이 증가될수록 일축압축강도와 할선탄성계수가 동시에 증가하였으며, 초속경 모르타르의 비율이 가장 큰 시료에서 양생 7일 후 급격한 일축압축강도와 할선탄성계수의 증가를 보여주었다. LWD 시험결과, 양생 1일된 시료에서는 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 증가되었으나, 양생 7일이 경과되면 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 감소되는 경향이 나타났다. 상관성 분석결과, 일축일축압축강도와 할선탄성계수가 증가할수록 회복탄성계수도 증가되는 선형관계를 보여주었다.

Keywords **:** CLSM, Early-age properties, LWD, strength, stiffness

Received *23 Nov. 2021,* ***Revised*** *15 Dec. 2021,* ***Accepted*** *21 Dec. 2021*

****Corresponding author***
Tel: +82-53-950-5732; Fax: +82-53-950-6752
E-mail address: yhbyun@knu.ac.kr (Y. H. Byun)

1. 서 론

유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)는 주로 시멘트, 비회, 골재 및 물이 혼합된 8.3MPa 이하의 저강도 콘크리트로써, CLSM으로 보강된 지하매설물의 재굴착 고려시 일축압축강도는 2.1MPa 이하가 되도록 배합 설계를 권장하고 있다(ACI Committee 229, 1999). 고유동성 및 자기다짐성, 장기 강도조절 및 협소한 공간의 적용성 등 여러 장점으로 인하여, CLSM은 도심지 매설관의 되메움, 옹벽배면 채움, 구조물의 전면기초 및 도로 하부층 타설, 그리고 폐광 충진 및 지반함몰 대책공법 등 다방면으로 활용되고 있다. 이러한 CLSM의 유변학적 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 다양한 실험기법을 활용한 연구가 진행되어 왔다(Han et al., 2016; Byun et al., 2016; Han et al., 2017; Han et al., 2019; Kim et al., 2021).

과거 도로 포장설계법은 CBR(California Bearing Ratio) 값 또는 지지력 계수를 설계정수로 활용하는 경험적 설계방법이 적용되어 왔다. 경험적 설계법은 시험법이 간편하나, 다양한 조건에서 지반의 역학적 특성을 반영할 수 없었다. 이로 인해, 경험적 설계법을 토대로 건설된 포장 도로들은 내구연한보다 빠르게 손상을 입거나 파괴되는 문제점이 발생된 바 있다 (Kweon, 1999; Kim, 2021). AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)에서는 경험적 설계법에서 발생한 문제점들을 해결하기 위하여, 새로운 설계정수인 회복탄성계수를 이용한 역학적-경험적 포장설계법을 제시하였다. 회복탄성계수는 윤하중을 모사한 조건의 반복삼축압축시험에서 획득된 응력-변형률 관계를 통해 산정될 수 있으나, 높은 비용의 시험장비 및 복잡한 시험절차로 인해 활용도가 낮은 편이다. 이에 따라, 현장에서 간편하고 신뢰성 있는 회복탄성계수를 추정하기 위하여 다양한 시험법을 적용할 수 있다.

현장에서 도로 노상토의 강도 및 강성을 산정하기 위하여 다양한 시험방법이 개발되어 왔다. 원위치 시험기법으로써, 정적 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT), 동적 콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT) 등이 이용되고 있으며, 특히 DCPT의 경우 시험방법이 간편하고 시험기의 이동성이 우수하여 노상토의 강도 평가에 널리 활용되고 있다. 그러나, 동적 콘관입기는 콘관입 시 유발된 대변형률(ε=0.1% 이상)에서 강도를 평가하므로, 중간변형률(ε=0.01～0.1%)에서 산정되는 회복탄성계수와 비교하기에 어려움이 있다(Kim et al., 2005; Clayton, 2011; Kim, 2015; Kim and Byun, 2019). 또한, 노상토의 강성특성을 평가하기 위해 비파괴 시험기법으로써, 흙강성측정기(Soil Stiffness Gauge, SSG), 소형 동평판재하시험기(Light Weight Deflectometer, LWD) 등이 이용되어 왔다. Sawangsuriya et al.(2003)은 SSG를 이용하여 조립토에 대한 강성을 산정한 후 삼축압축시험, 반복삼축압축시험, 공진주시험, 탄성파시험으로 도출된 강성과 비교분석한 바 있다. Alshibli et al.(2005)은 여러 종류의 지반재료에서 LWD의 적용성을 평가하였으며, Stamp and Mooney(2013)는 LWD의 설계 특성이 측정된 변위와 산정된 강성에 영향을 미친다고 보고하였다. 이와 같이, 국내·외에서 LWD를 활용하여 지반의 다짐관리, 도로 재료의 강성 측정 등 다양한 영역에서 연구가 진행되어 왔다(Fleming et al., 2007; Choi et al., 2017; Park et al., 2019; Park et al., 2021). 그러나, 아직까지 도로 하부의 채움재로 적용되는 CLSM의 강성을 평가하기 위한 현장시험기법에 대한 연구는 부족한 실정이며, CLSM 적용 후 지속적으로 가해지는 윤하중에 대한 내구성을 평가하기 위하여, CLSM의 강성 평가기법이 요구된다.

본 연구에서는 조기강도의 발현을 목적으로 개발된 CLSM의 강도 및 강성 특성을 규명하고, 비파괴적인 기법으로써 LWD를 이용하여 CLSM의 회복탄성계수를 평가하고자 하였다. 먼저, 실험에 사용된 5종류의 CLSM 시료의 구성재료 특성을 기술하였으며, 배합비별 유동성 및 경화특성을 조사하였다. 또한, 양생시간별 CLSM 시료의 강도 및 강성 특성을 파악하기 위해 수행된 일축압축강도시험의 결과를 설명하였다. LWD를 이용하여 회복탄성계수를 평가하기 위한 방법을 정의한 후, CLSM 시료에서 수행된 소형 동평판재하시험에 대한 실험방법과 결과에 대해 서술하였다. 마지막으로, 압축압축시험 및 소형 동평판재하시험에서 산정된 CLSM 시료의 탄성계수, 일축압축강도, 회복탄성계수의 상관성을 분석 및 토의하였다.

2. 유동성 채움재

2.1 재료 구성

본 연구에서 사용된 CLSM는 1종 보통 포틀랜드시멘트, 초속경 모르타르, 비회, 모래와 급결제, 그리고 물을 혼합하여 제조하였다. 보통 포틀랜드시멘트 및 초속경 모

Table 1. Mixing ratio of CLSM by weight

FC	Cement [%]		Fly ash [%]	Sand [%]	Accelerator [%]	Water [%]
	Fast	Ordinary				
10	1.6	14.8	12.3	45.2	1	25.1
30	4.9	11.5	12.3	45.2	1	25.1
50	8.2	8.2	12.3	45.2	1	25.1
70	11.5	4.9	12.3	45.2	1	25.1
90	14.8	1.6	12.3	45.2	1	25.1

르타르의 3일 일축압축강도는 각각 34.5MPa, 40.5MPa로 산정되었다. 비회의 물리적 특성으로 밀도는 2.2g/cm^{3}이며 분말도는 3850cm^2/g로 나타났으며, 화학적 특성으로 SiO_2, SO_3, CaO, MgO 성분이 각각 62.9%, 0.1%, 2.1%, 0.8% 함유되어 있다. 모래는 평균입경이 각각 0.53mm 및 0.17mm인 두 종류의 규사를 사용하여, 2.67 대 1의 무게비로 혼합하여 사용하였다. 알칼리프리계 급결제를 사용함으로써, 경화과정을 촉진시켰으며, 물은 약 15°C의 수돗물을 사용하여 CLSM을 배합하였다. 초속경 모르타르와 1종 보통 포틀랜드시멘트의 총량에서 초속경 모르타르의 비율(Fast setting mortar content, FC)을 10, 30, 50, 70, 90%로 변화시킴으로써 5종류의 배합비를 도출하였으며, CLSM를 구성하는 전체 재료의 배합비를 Table 1에 정리하였다. 배합과정에 의한 CLSM의 특성변화를 최소화하기 위하여, 초속경 모르타르, 1종 보통 포틀랜드시멘트, 비회, 두 종류의 모래를 건배합하였으며, 물과 혼합하여 일정 시간이 경과된 후에 급결제를 첨가하였다. 이와 같이 배합과정을 수행하여, CLSM의 배합시간은 총 2분이 초과되지 않도록 하였다.

3. 실험 및 결과

본 논문에서는 CLSM의 유동성, 경화특성, 조기 강도 및 강성 특성을 평가하기 위하여, 5종류의 배합비로 시료를 조성하여 플로우 시험 및 응결시간 시험을 수행하였으며, 양생 1일 및 7일 후, 일축압축강도시험 및 소형 동평판 재하시험을 수행하였다.

3.1 유동성 및 경화특성

본 연구에서는 FC에 따른 5종류의 CLSM의 유동성 및 경화특성을 평가하기 위해 플로우 시험 및 응결시간 시험을 수행하였다. 플로우 시험은 ASTM D6103(2004)에 제시된 방법을 준용하였으며, 퍼진 시료의 최대 직경 및 수직방향의 직경을 측정하여 평균값으로 플로우값을 산정하였다. Fig. 1을 보면, 5종류의 시료 모두 ACI Committee 229(1999)에 규정되어 있는 기준 플로우값 200 mm 이상을 상회하는 것으로 나타났다. FC=30% 이상의 시료에서는 전반적으로 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 플로우값이 증가하였다. 다만, 초속경 모르타르가 가장 적게 배합된 FC=10% 시료에서는 플로우값이 FC=30% 및 FC=50%인 경우 보다 다소 높게 도출되었다. 이는 혼합된 각 재료의 입도분포 조합에 따라, CLSM의 유동성이 영향받는 것으로 판단된다.

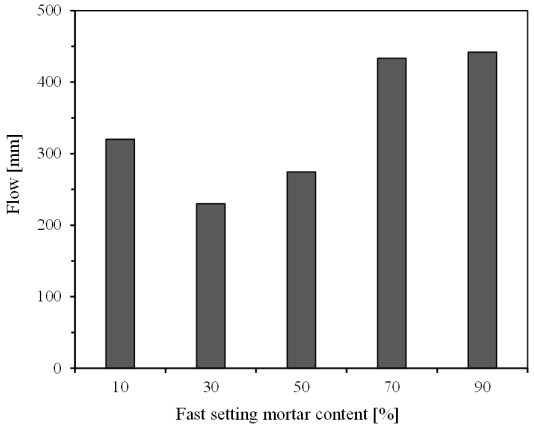


Fig. 1. Results of flow values with mixing ratio

배합설계된 CLSM의 경화특성을 파악하기 위하여, ASTM C191(2013)에 따라 응결시간시험을 수행하였다. 시료 양생 30분 후부터 15분 간격으로 관입시험을 실시하여 도출된 침입도를 Fig. 2에 도시하였다. 25mm의 침입도를 보이는 시점을 초결시간으로 정의하고(ASTM C191, 2013), 침의 관입이 종료된 시점을 종결시간으로 결정하여, 5종류 CLSM에 대한 초결 및 종결시간을 Table 2에 정리하였다. 초속경 모르타르의 비율이 가장 높은 FC=90% 시료에서 초결 및 종결 시간이 가장 빠르게 나타났으며, FC가 감소함에 따라 초결 및 종결 시간이 증가함을 보여주었다.

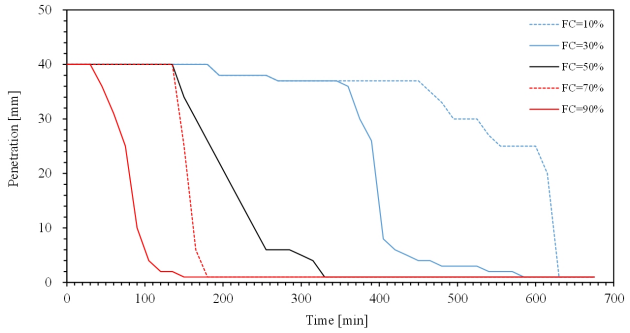


Fig. 2. Results of Vicat needle tests at five different mixtures

Table 2. Results of flow values, initial and final setting time with mixing ratio

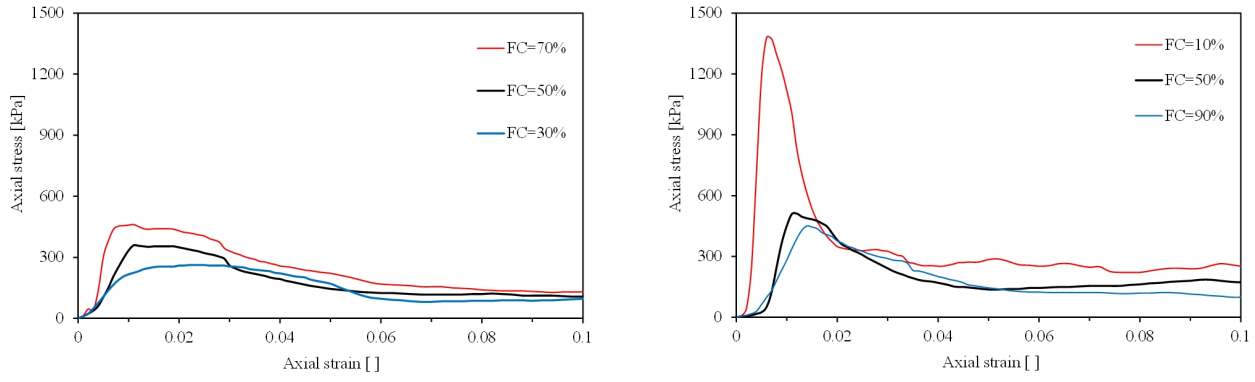
FC	Flow [mm]	Setting time [min]	
		Initial	Final
10	320	555	630
30	230	395	585
50	275	185	330
70	434	150	180
90	442	77	150

3.2 일축압축강도시험

일축압축강도시험을 수행하기 위하여, 직경과 높이가 50mm 및 100mm인 시료를 수중양생하였다. 일정기간 양생 후, 하중용량 25 kN의 압축시험기를 이용하여 1mm/min의 속도로 압축하중을 재하함으로써 일축압축강도시험을 수행하였다. 각 양생일에서 축방향 변형률에 따른 압축응력의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 시멘트 구성비율에 따라 응력-변형률 선도의 변화를 보이는 3개의 대표적인 시료에 대해 비교하였다. 양생 1일 경과 시, 초속경 모르타르의 비율이 높은 시료에서 보다 급격한 압축응력의 증가와 상대적으로 높은 최대값을 보여주었다. 초속경 모르타르의 비율이 낮은 시료에서 상대적으로 완만한 응력 증가와 낮은 최대값을 나타냈다. 따라서, 초속경 모르타르가 많이 포함될수록 초기에 강도발현이 더 촉진됨을 알 수 있다. 반면, 양생 7일이 경과된 경우, 초속경 모르타르 비율이 가장 적은 시료에서 급격한 압축응력의 증가와 가장 높은 최대값을 보여주었다. 양생 1일의 경우와 달리, 상대적으로 초속경 모르타르의 비율이 높은 시료에서는 상대적으로 완만한 응력 증가와 낮은 일축압축강도를 나타냈다. 이를 통하여, 양생기간이 길어지면, 보통 포틀랜드시멘트의 비율이 높은 시료에서 강도발현이 더 촉진되는 것을 알 수 있다.

동일한 조건에서 일축압축강도시험을 2회 반복적으로 수행하여, 응력-변형률 선도에서의 최대값을 평균함으로써, 해당 양생일의 일축압축강도로 결정하였다. 또한, 응력-변형률 선도 초기의 선형구간에서 연장된 선을 이용하여 영점보정 후, 일축압축강도의 50%에 해당하는 변형률에서 할선탄성계수(E_{50})를 산정하였다(Han et al. 2021). Fig. 4에서는 양생 1일과 7일의 초속경 모르타르의 비율에 따른 일축압축강도와 할선탄성계수를 비교하였다. Fig. 4(a)를 보면, 양생 1일 후 FC=30% 이상의 시료에서는 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 대체로 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 양생 7일 후, 보통 포틀랜드 시멘트의 비율이 가장 높았던 FC=10%에서 일축압축강도가 상당히 증가하였다. FC=30% 이상의 시료에서는 FC가 증가함에 따라 7일차 강도가 다소 감소하였으나 변화된 크기는 미미하였다. 양생 1일에서 7일 사이에서, 보통 포틀랜드시멘트의 비율이 증가함에 따라, 일축압축강도의 증가량이 증가함을 뚜렷이 보여주었다.

응력-변형률 선도 초기의 선형구간에서 산정된 할선탄성계수는 초속경 모르타르의 비율에 따라 Fig. 4(b)에 도



(a) (b)

Fig. 3. Stress–strain curves obtained from unconfined compressive tests after curing on: (a) 1 day; (b) 7 days

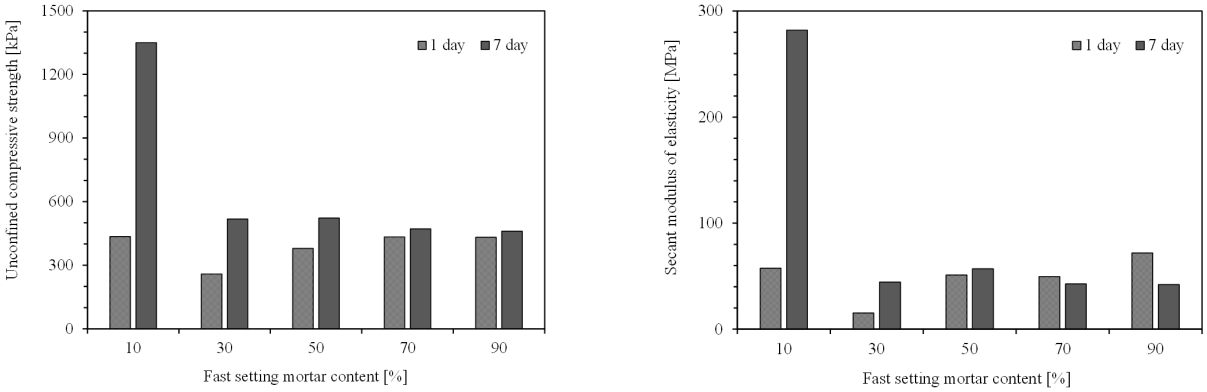


Fig. 4. Results of unconfined compressive tests: (a) unconfined compressive strength; (b) secant modulus of elasticity

시하였다. 일축압축강도의 결과와 마찬가지로, 양생 1일 후 FC=30% 이상의 시료에서는 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 대체로 할선탄성계수도 증가하였다. 또한, 양생 7일에는 FC=10%에서 할선탄성계수가 가장 높게 나타난 반면, FC=30% 이상의 시료에서는 뚜렷한 변화를 보이지 않았다.

3.3 소형 동평판재하시험

일반적으로 LWD를 이용하여 정적해석을 근간으로 지반의 탄성계수를 평가 시, 지반을 등방 및 균질의 탄성 반무한체로 가정한다. 그러나, 본 연구에서는 소형 동평판재하시험을 위하여 원통형 CLSM 실험체를 조성하였으며, 이러한 시료의 형상 및 경계조건을 고려하여 반복삼축압축시험에서 회복탄성계수를 산정하는 방법을 이용함으로써 CLSM 실험체의 강성 특성을 평가하였다. LWD 시험 중, 로드셀과 지오폰에서 측정된 하중과 변위로부터 회복탄성계수 (M_r)을 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} \tag{1}$$

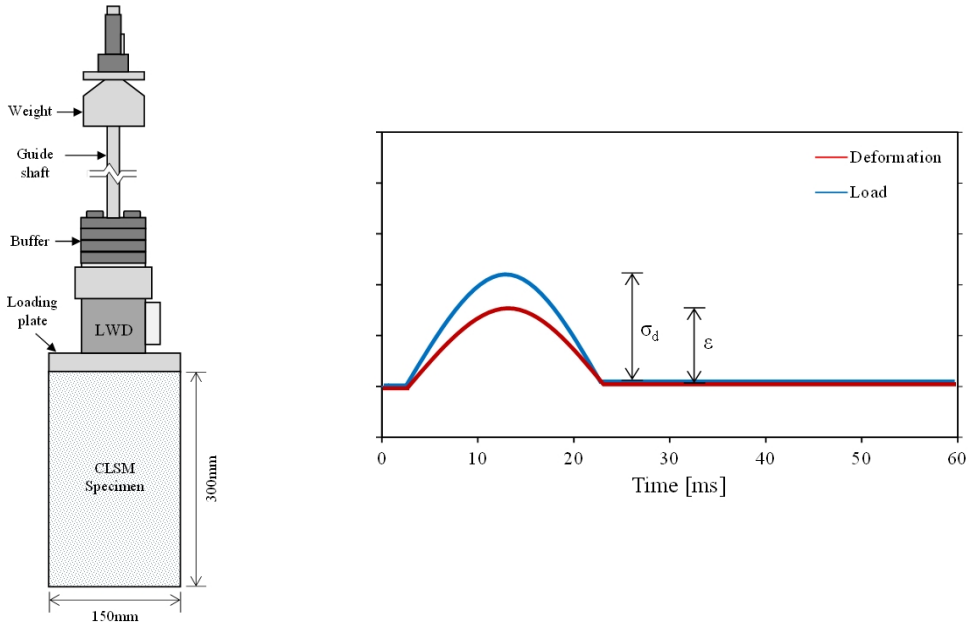
여기서, σ_d는 로드셀에 측정된 최대하중을 재하판의 넓이로 나누어 결정된 연직 응력이고, ε는 지오폰에서 산정된 최대변위를 시료의 높이로 나눈 변형률을 나타낸다. 식 (1)을 이용하면, 기존의 LWD시험분석과정처럼 시험체의 포아송비를 가정하지 않고도, 반복삼축압축시험과 같이 LWD 시험으로부터 회복탄성계수를 간단히 결정할 수 있다(Byun and Kim, 2020).

CLSM로 일정기간 양생한 직경 및 높이가 각각 150mm, 300mm인 원통형 실험체를 탈형시킨 후, Fig. 5(a)와 같이 CLSM 실험체 표면에서 소형 동평판재하시험을 수행하였다. 동평판재하시험은 무게 추를 높이 300mm에서 낙하한 후, 직경 150mm의 재하판에 전달된 하중 및 변위의 변화를 측정함으로써 수행되었다. 동일한 시료에서 무게 추를 총 6회 낙하하였으며, 그 중 초기 3회 시험결과는 재하판의 정착을 위한 과정으로 간주하여, 최종 3회 낙하 시 측정된 하중 및 변위를 분석에 이용하였다. Fig. 5(b)와 같이 시간경과에 따른 하중 및 변위의 변화에서 최대하중 및 최대 변위를 이용하여 회복탄성계수를 산정하였다.

양생 1일 및 7일에서 각 시료마다 산정된 평균 회복탄성계수를 Fig. 6에 도시하였다. 양생 1일의 경우, FC=10%를 제외하면, 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 증가되었다. 이러한 경향은 양생 1일에서 일축압축강도 및 할선탄성계수의 변화와 유사함을 알 수 있다. 또한, 초속경 모르타르의 비율이 가장 많은 FC=90% 시료에서 가장 높은 회복탄성계수를 보여주었다. 반면, 양생 7일의 경우, FC=10%에서 가장 높은 회복탄성계수를 보여주고 있으며, 전반적으로 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 감소하는 경향을 보여주었다. FC=10%의 경우, 양생 1일 및 7일에서 일축압축강도와 할선탄성계수의 결과와 유사하게 회복탄성계수도 양생시간에 따라 가장 큰 변화를 보여주었다.

3.4 상관성 분석

소형 동평판재하시험에서 산정된 회복탄성계수를 일축압축강도시험으로부터 산정된 일축압축강도 및 할선탄성



(a) (b)

Fig. 5. Schematic drawings of light weight deflectometer test: (a) test setup on the CLSM specimen; (b) typical load and deformation curves

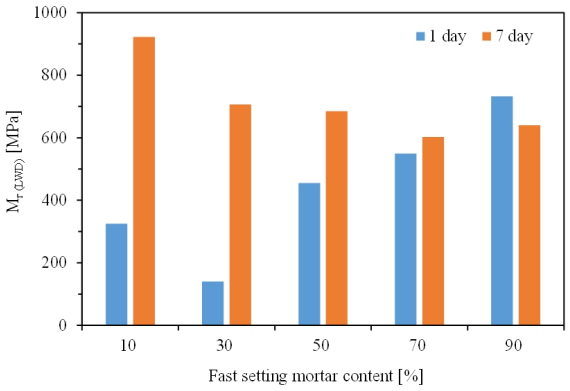
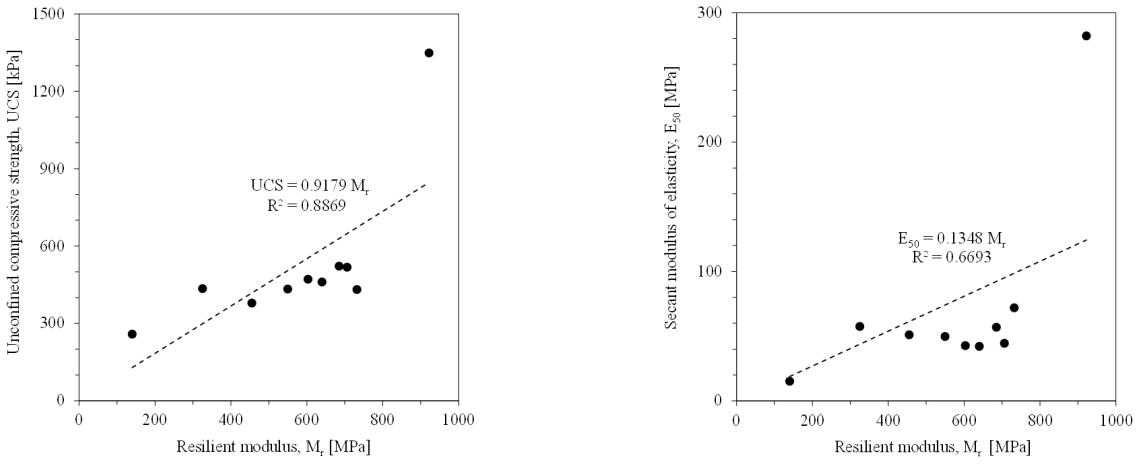


Fig. 6. Average resilient modulus obtained from the LWD at different curing times

계수와 비교하여 상관성을 분석하였다. Fig. 7(a)에서는 회복탄성계수와 일축압축강도의 관계를 보여주고 있다. 전체적으로 선형관계를 따라 일축압축강도가 증가할수록 회복탄성계수가 증가하였으며, 선형관계는 0.918의 기울기를 보이며 결정계수는 0.887로 도출되었다. Fig. 7(b)에서는 회복탄성계수와 할선탄성계수의 관계를 도시하고 있으며, 소형 동평판재하시험에서 산정된 회복탄성계수가 일축압축강도시험으로부터 산정된 할선탄성계수보다 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 회복탄성계수와 할선탄성계수의 관계를 선형으로 회귀분석한 결과, 결정계수는 상대



(a) (b)

Fig. 7. Relationship between resilient modulus and UCS test results: (a) unconfined compressive strength; (b) secant modulus of elasticity

적으로 낮은 0.669로 산정되었다. 이와 같은 관계식으로부터 회복탄성계수와 할선탄성계수의 상호 추정은 제한적으로 고려되어야 하며, 향후 실험결과를 추가함으로써 보다 정확한 상관성의 도출이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 소형 동평판재하시험에서 산정된 회복탄성계수와 일축압축강도시험으로부터 산정된 일축압축강도 및 할선탄성계수는 각 시험법마다 변형률 수준에 차이가 있다는 점에서 비교 시 주의할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일축압축강도시험과 소형 동평판재하시험을 통하여 유동성 채움재의 조기 강도 및 강성 특성을 평가하였다. CLSM는 초속경 모르타르, 1종 보통 포틀랜드시멘트, 모래, 물, 그리고 급결제를 혼합하여 배합하였다. CLSM에 혼합된 초속경 모르타르의 비율에 따른 유동성 및 경화 특성에 관한 실험을 시행하였다. 또한, 일축압축강도시험과 소형 동평판재하시험에서 획득된 결과를 토대로 상관성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 플로우값이 증가하는 경향을 보이는 반면, 초결 및 종결 시간은 감소하는 것으로 나타났다.
(2) 일축압축강도시험 결과, 대체로 양생 초기에는 초속경 모르타르의 비율이 높을수록 CLSM시료의 조기 강도 및 강성이 증가됨을 보여주었다. 일정시간이 더 경과된 후, 초속경 모르타르의 비율이 가장 낮은 시료에서 강도 및 강성이 상당히 크게 증가하는 것으로 나타났다.
(3) 소형 동평판재하시험 수행 시 양생 초기의 시료에서 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 증가되었다. 반면에 양생일이 경과된 시료의 경우, 전반적으로 초속경 모르타르의 비율이 증가할수록 회복탄성계수가 감소되었다.
(4) 소형 동평판재하시험에서 도출된 회복탄성계수와 일축압축강도 사이에서는 선형적으로 증가하는 관계를 보여주었다. 회복탄성계수와 할선탄성계수의 관계에서도 선형적인 증가 경향을 보이나, 상대적으로 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과를 통하여, 현장의 요구 강도와 강성 특성에 맞추어 배합설계를 제시할 수 있으며, 향후 추가적으로 실험을 수행함으로써 보다 정확한 상관관계의 도출이 요구된다. 본 연구를 통하여, LWD시험을 이용한 CLSM의 회복탄성계수의 평가에 대한 가능성을 보여주었으며, 더 나아가 정적상태에서 산정된 일축압축강도 및 할선탄성계수의 추정까지 가능할 것으로 예상된다.

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 21CTAP-C164273-01).

References

1. ACI Committee 229 (1999), Controlled low-strength materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-99, pp.1-15.
2. Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M. and Seyman, E. (2005), “Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools”, *Journal of materials in civil engineering,* Vol.17, No.5, pp.560-569.
3. ASTM C191 (2013), Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, American Society for Testing and Materials, pp.1-8.
4. ASTM D6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low-strength material (CLSM), American Society for Testing and Materials, pp.1-3.
5. Byun, Y. H. and Kim, D. J. (2020), “In-situ modulus detector for subgrade characterization”, *International Journal of Pavement Engineering*, pp.1-11.
6. Byun, Y. H., Han, W. Tutumluer, E. and Lee, J. S. (2016), “Elastic wave characterization of controlled low-strength material using embedded piezoelectric transducers”, *Construction and Building Materials,* Vol.127, pp.210-219.
7. Choi, J. S., Jung, C. H. Lee, C. H. and Lim, I. S. (2017), “Study of the curing time of cementless cold central plant recycled asphalt base-layer through field-application review”, *International journal of highway engineering*, Vol.19, No.2, pp.67-74.
8. Clayton, C. R. I. (2011), “Stiffness at small strain: research and practice”, *Geotechnique,* Vol.61, No.1, pp.5-37.
9. Fleming, P. R., Frost, M. W. and Lambert, J. P. (2007), “Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness”, *Transportation research record,*

Vol.2004, No.1, pp.80-87.
10. Han, W., Kim, S. Y. Lee, J. S. and Byun, Y. H. (2019), “Friction behavior of controlled low strength material–soil interface”, *Geomechanics and Engineering,* Vol.18, No.4, pp.407-415.
11. Han, W., Lee, J. S. and Byun, Y. H. (2017), “Estimation of Flowability and Strength in Controlled Low Strength Material Using Multiple Regression Analysis”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society,* Vol.18, No.12, pp.65-75.
12. Han, W., Lee, J. S. Byun, Y. H. Cho, S. and Kim, J. (2016), “Study on characteristics of controlled low strength material using time domain reflectometry”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society,* Vol.17, No.4, pp.33-37.
13. Han, W., Lee, J. S. Jeong, S. H. Lim, D. S. and Byun, Y. H. (2021), “Evaluation of engineering properties of expandable foam grout with admixture content”, *Construction and Building Materials,* Vol.293.
14. Kim, D. J. (2021), *Development of in-situ modulus detector for evaluation of the resilient modulus of subgrade soil*, Master’s Thesis, Kyungpook National University.
15. Kim, D. J. and Byun, Y. H. (2019), “Development and performance evaluation of In-situ dynamic stiffness analyzer”, *Journal of the Korean society of agricultural engineers,* Vol.61, No.2, pp.41-50.
16. Kim, D. S., Seo, W. S. and Kweon, G. C. (2005), “Evaluation of field nonlinear modulus of subgrade soils using repetitive static plate bearing load test”, *Journal of the Korean geotechnical society,* Vol.21, No.6, pp.67-79.
17. Kim, K. S. (2015), “Comparison of elastic moduli of subgrade soils using plate loading test, soil stiffness gauge and dynamic cone penetrometer”, *Journal of the Korean geotechnical society,* Vol.31, No.3, pp.63-72.
18. Kim, S. C., Kim, D. J. and Byun, Y. H. (2021), “Effect of Fly Ash on Strength and Stiffness Characteristics of Controlled Low-Strength Material in Shear Wave Monitoring”, *Materials,* Vol.14, No.11.
19. Kweon, G. C. (1999), *Alternative M_R testing methods for subgrade and subbase materials considering deformational characteristics of soils*, Ph.D Thesis, Korea advanced institute of science and technology.
20. Park, J. J., Shin, H. S. Chung, Y. S. You, S. K. and Hong, G. W. (2019), “A study on the open cut restoration of underground cavity using concrete mat”, *Journal of the Korean geosynthetics society,* Vol.18, No.1, pp.55-65.
21. Park, Y. H., Jang, I. Y. and Do, J. N. (2021), “Utilization of LFWD for compaction management of embankment in expressway construction”, *Journal of the Korean geo-environmental society,* Vol.22, No.3, pp.45-51.
22. Sawangsuriya, A., Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (2003), “Relationship between soil stiffness gauge modulus and other test moduli for granular soils”, *Transportation research record,* Vol.1849, No.1, pp.3-10.
23. Stamp, D. H. and Mooney, M. A. (2013), “Influence of lightweight deflectometer characteristics on deflection measurement”, *Geotechnical testing journal,* Vol.36, No.2, pp.216-226.