

소일시멘트의 일축압축강도 특성 및 시간의존 거동

Unconfined Compressive Strength Characteristics and Time Dependent Behavior of Soil-Cement

김 종 렬* 강 희 복** 강 화 영** 김 도 형***
Kim, Jong-Ryeol Kang, Hee-Bog Kang, Hwa-Young Kim, Do-Hyoung

Abstract

As a special concrete, which is a mixture of soil, cement and water, has strength like regular concrete for pavement, soil cement has been used in various field such as pavement and soft soil improvement. The objective of this study was to investigate the characteristic of unconfined compressive strength and time dependent behavior of soil cement that is made from decomposed granite soil or coluvial and inorganic solidification liquid. The results showed that the unconfined compressive strength appears to increase as the amount of cement and curing time increase. In addition, the strength seems to decrease with increase of the portion of fine particles(No 200 sieve). The result of XRD indicated that there is Vermiculite, the product of reaction, in the soil cement. The dynamic properties of material, such as shear complex compliance, shear complex modulus, and phase angle could be calculated from the hysteresis loop obtained from the Haversine Creep Tests. Finally, creep behavior was able to be predicted from these dynamic properties.

요 지

소일시멘트는 자연 상태의 흙을 주원료로 시멘트, 혼합수를 배합하여 일반포장용 콘크리트에 준하는 강도를 발휘하는 특수콘크리트로서 최근 도로포장뿐만 아니라 연약지반 개량 등 여러 분야에 활용되고 있다. 본 연구에서는 화강토 및 불적토에 고화제를 첨가하여 일축압축강도의 특성 및 시간의존 거동을 규명하고자 하였다. 연구 결과 일축압축강도는 시멘트 함량의 증가와 양생기간의 증가에 따라 뚜렷한 강도 증가를 나타내었으며 미 세립분이 많을수록 강도가 감소하였으며 X-선 회절 분석 결과 소일시멘트에서 반응생성물인 Vermiculite가 발견되었다. 동적반복재하크리프 시험 결과 히스테리시스 곡선으로부터 재료의 동적특성인 복합전단컴플라이언스, 복합전단탄계수, 위상각을 구하였으며 재료의 동적특성으로부터 크리프 거동의 예측이 가능하였다.

Keywords : Soil Cement, Hysteresis Loop, Shear Complex Compliance, Phase Angle

핵심 용어 : 소일시멘트, 이력곡선, 복합전단컴플라이언스, 위상각

* 정희원, 전남대 토목공학과 교수, 공학박사

** 정희원, 한영대학 토목환경과 조교수, 공학박사

*** 정희원, 전남대 토목공학과 석사과정

E-mail kang4104@hanmail.net 061-650-4104

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

현대에 들어서 자동차의 보급률이 확대되어 교통량이 급속도로 증가함에 따라 고속도로, 국도 및 지방도로는 물론 자전거 전용도로, 주차장, 광장 및 체육시설 등 포장 보급률이 크게 증가하고 있는 실정이다 그러나 기존의 콘크리트 포장이 강도 면에서는 우수하나 균열 또는 파괴 시 보수, 보강이 어렵고 미관상으로도 좋지 않은 단점 때문에 미국과 캐나다 등지에서 대단위 도로포장용 재료로 소일시멘트를 사용하고 있다 (HRB, 1961)

소일시멘트는 흙, 시멘트, 혼합수를 배합하여 일반 포장용 콘크리트에 준하는 중·저강도부터 구조물용도의 고강도까지 발현 가능한 특수콘크리트로서 자연 상태의 흙을 주원료로 하는 만큼 자연 친화적이며 주변 환경과 조화를 이룰 수 있는 신재료 및 신공법의 포장이라 할 수 있다 지금까지는 주로 특수 고화제를 이용한 일축압축강도의 특성을 파악하는데 주안점을 두고 많은 연구가 이루어 졌다 (김병일 등, 2003) 그러나, 이러한 소일시멘트 재료가 도로포장 및 보조기층 재료로 활용되면서 차륜하중에 의한 동적반복하중의 재하로 인해 시간의 경과에 따라 변형이 증가하는 시간 의존적 거동(크리프)이 발생하는데 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다

따라서, 본 연구에서는 화강도 및 봉적토에 고화제를 첨가하여 소일시멘트 공시체를 만든 후 입자의 변화 과정을 확인하기 위해 양생기간에 따라 전자 현미경 분석(SEM)을 실시하고 X-선 회절 분석을 통한 화학성분을 분석하였으며 재령별 일축압축강도의 경시 변화와 정현파의 동적하중을 재하 하여 각각의 주파수 (0.01Hz, 0.05Hz, 0.2Hz) 에 따른 재료의 동적특성 및 시간의존거동을 규명하고자 하였다

2. 기본이론

2.1 동적반복재 하크리프 변형률

Fig 1은 정현파의 적용응력과 변형률관계를 나타낸 것이며 하중 조건은 식 1과 같다

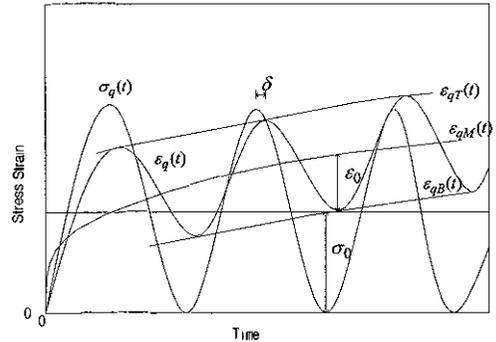


Fig 1 시간에 따른 응력-변형률 관계

$$\sigma_q(t) = \sigma_0(1 - \cos \omega t) = \sigma_0 - \sigma_q^0(t) \quad (1)$$

여기서 σ_0 는 응력이고 ω ($\omega = 2\pi/T$)는 주파수이며, T 는 주기이다

선형점탄성재료에 정현파의 응력재하시 발생하는 변형률은 식 2와 같이 쓸 수 있다

$$\epsilon_q(t) = \epsilon_{qM}(t) - \epsilon_0 \cos(\omega t - \delta) = \epsilon_{qM}(t) - \epsilon_q^0(t) \quad (2)$$

여기서 $\omega_\epsilon = \omega_\sigma = \omega$, $\epsilon_q^0(t) = \epsilon_0 \cos(\omega t - \delta)$, δ 는 위상각이며 모두 주파수의 함수이다

2.2 재료의 동적 특성

선형 점탄성재료에 $\sigma_q^0(t) = \sigma_0 \cos \omega t$ 의 정현파의 응력이 재하 되면 변형률은 동일한 주파수에서 정현파의 형태를 보이지만 위상각 δ 만큼 늦어지게 되며 정현파의 응력 $\sigma_q^0(t)$ 과 대응하는 변형률 $\epsilon_q^0(t)$ 는 식 3, 4 와 같다

$$\sigma_q^0(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$\epsilon_q^0(t) = \epsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} = \epsilon_0 e^{i\omega t} (\cos \delta - i \sin \delta) \quad (4)$$

여기서, $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$ 이다.

복합전단컴플라이언스 $J_q^*(\omega)$ 을 사용하여 응력과 변형률의 관계를 나타내면 식 5와 같으며 복합전단컴플라이언스의 크기 $|J_q^*(\omega)|$ 는 식 6과 같이 쓸 수 있다

$$J_q^*(\omega) = \frac{\epsilon_0}{\sigma_0} = \frac{\epsilon_0}{\sigma_0} (\cos \delta - i \sin \delta) = J_{q1}(\omega) - i J_{q2}(\omega) \quad (5)$$

$$|J_q^*(\omega)| = \left| \frac{\epsilon_0}{\sigma_0} \right| = [J_{q1}^2(\omega) + J_{q2}^2(\omega)]^{1/2} \quad (6)$$

여기서 $J_{q1}(\omega)$ 는 보존 컴플라이언스,

$J_{q2}(\omega)$ 는 손실 컴플라이언스이다.

또한, 동일한 방법으로 복합전단계수 $G^*(\omega)$ 와 복합전단계수의 크기 $|G^*(\omega)|$ 는 다음과 같이 정의된다 (Y Sawaragi 등, 1954)

$$G^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta) = G_1(\omega) + i G_2(\omega) \quad (7)$$

$$|G^*(\omega)| = \left| \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \right| = [G_1^2(\omega) + G_2^2(\omega)]^{1/2} \quad (8)$$

여기서, $G_1(\omega)$ 는 보존계수 이고

$G_2(\omega)$ 는 손실계수 이다

식 5 와 7, 식 6 과 식 8 을 비교하면 다음과 같은 관계가 됨을 알 수 있다

$$J_q^*(\omega) G^*(\omega) = 1 \quad (9)$$

$$|J_q^*(\omega)| |G^*(\omega)| = 1, \tan \delta = \frac{J_{q2}(\omega)}{J_{q1}(\omega)} = \frac{G_2(\omega)}{G_1(\omega)} \quad (10)$$

선형점탄성재료에서 이러한 관계를 타원체의 응력이력곡선으로 나타낼 수 있으며 Fig 2에 보는 바와 같다

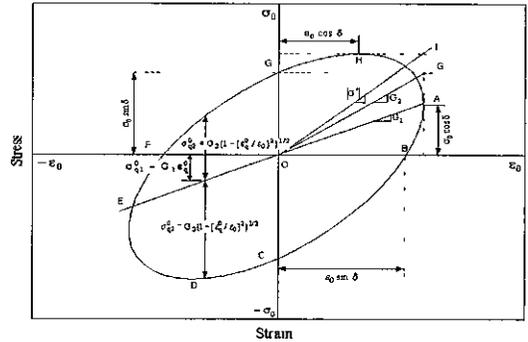


Fig 2 응력-변형률 관계(히스테리시스루프)

3. 시험

3.1 사용재료

사용된 흙은 광주광역시 신창지구 택지 조성공사 현장과 광주 제 2순환 도로 현장에서 채취하여 자연 건조 시킨 후 사용하였다 시료의 물리적 성질을 파악하기 위해 시료의 비중(KS F 2308), 체가름(KS F 2309), 입도(KS F 2302), 정적 액성한계시험을 수행하였으며 흙의 기본물성은 Table 1과 같다 또한 입도분포곡선은 Fig. 3과 같으며 세립분 함량이 화강토는 11.7%, 불적토는 33.9%이며 두 시료 모두 통일 분류법에 의해 SM에 해당된다 고화제는 국내에서 개발된 G사의 용액을 첨가제로 사용하였으며 주성분은 MgSO₄, Mg₂O₄, K₂SO₄, NH₄CL 등을 첨가한 분말형 형태이다 시멘트는 일반적으로 많이 사용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다

Table 1 시험에 사용된 흙의 기본물성

구분	시료의 물성	
	화강토	불적토
비중	2.60	2.65
#200체 통과량(%)	11.7	33.9
액성한계(%)	33.9	35.87
Sand(%)	88.29	66.11
Silt(%)	7.69	25.79
Clay(%)	4.02	8.10
통일분류(USCS)	SM	SM

3.2 배합조건 및 공시체 제작

소일시멘트는 배합비율에 따라 강도가 좌우 되므로 본 연구에서는 세립분이 다른 2가지의 시료에 대해 Table 2와 같은 배합비로 공시체를 제작하여 일축압축강도 및 동적반복재하크리프 시험을 실시하였다. 물/시멘트비를 일정하게 한 후 화강토에 대해 전체 배합량에 대한 시멘트함량이 4, 8, 10%가 되도록 3가지의 배합조건을 만들었으며 붕적토에 대해서도 각각 3가지의 배합으로 총 6가지에 대해 시험을 실시하였다. 이는 시멘트 함량과 세립분이 강도에 미치는 영향을 파악하기 위함이다. 공시체 제작은 PVC mold (직경 51.5mm, 높이 103mm)의 저판에 아크릴을 본드로 부착하여 고정시키고 배합시료를 교반한 후 몰드에 넣고 균질한 공시체를 제작하기 위하여 유압잭을 이용하여 시편마다 동일한 정적하중을 재하 하였다. PVC mold 내에서 성형된 공시체는 1일이 경과한 후 추출하여 양생시켰으며 Photo 1은 성형된 공시체를 나타낸다.(강희복 등, 2003)

일축압축강도 시험은 100ton 용량의 일축압축시험기를 사용하여 KSF2405 규정에 따라 실시하였으며 시간의존 거동을 알아보기 위한 동적반복재하크리프 시험은 Chan(1990)이 개발한 자동화 진동 삼축압축시험기를 사용하였다.(Photo 2 참조)

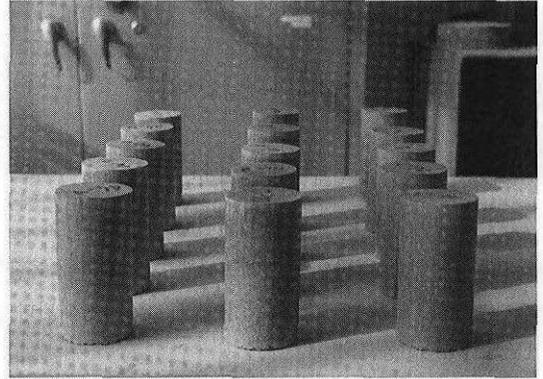


Photo 1 성형된 공시체

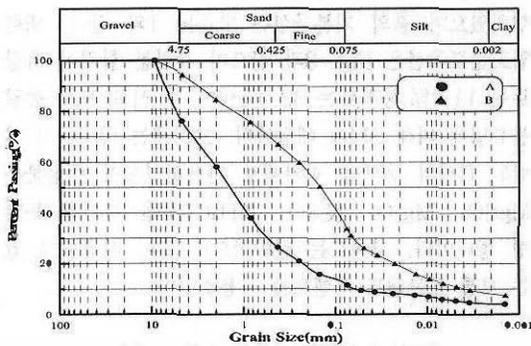


Fig. 3 입도분포곡선

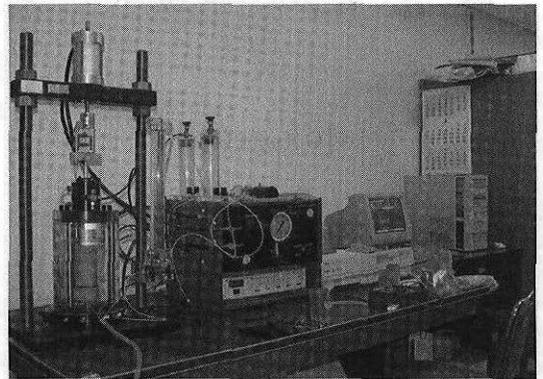


Photo 2 진동 삼축압축 시험장치

Table 2 공시체 성형에 사용된 배합비

배합분류	물/시멘트(%)	고화제:물	단위(g)				시멘트비(%)	
			화강토/붕적토	시멘트	고화제	물		
화강토	A	200	1:15 (0.58%)	377	18.85	2.51	37.7	4
	B	200	1:15 (0.91%)	377	32.78	4.37	65.56	8
	C	200	1:15 (1.09%)	377	41.43	5.52	82.86	10
붕적토	D	200	1:15 (0.58%)	377	18.85	2.51	37.7	4
	E	200	1:15 (0.91%)	377	32.78	4.37	65.56	8
	F	200	1:15 (1.09%)	377	41.43	5.52	82.86	10

3.3 시험방법

일축압축강도시험은 양생 시작 후 재령 3일, 7일, 14일, 28일의 시편에 대해 강도시험을 실시하였으며 1회 압축강도 시험의 공시체는 5개조를 실시하여 파괴 강도의 $\pm 5\%$ 이상인 결과 값은 제외하고 나머지 결과를 평균하여 사용하였다. 동적반복재하 크리프 시험에서 공시체는 상·하판 사이의 마찰에 의한 구속을 없애기 위해 상판 및 저판에 실리콘 그리스를 얇게 바른 후 setting하였다 시료를 포함하여 상·하판을 둘러싸고 있는 고무막은 방수 및 공기의 차단을 위하여 2개의 O-Ring으로 밀봉하였으며 여기에 사용된 고무막은 그 탄성이 공시체에 미치는 영향을 고려하여 0.3mm 두께의 Membrane을 사용하였다 크리프 시험은 A배합 시료에 대해 적용응력 60.0kPa하에서 축압은 가하지 않고 일축으로 동적크리프시험을 실시하였으며 주파수는 0.01Hz, 0.05Hz, 0.2Hz를 적용하였다

4. 시험결과

4.1 일축압축강도

각 시료에 대한 일축압축강도시험 결과는 Table 4와 같으며 이를 알기 쉽게 도시하면 Fig 4와 같다 그림에서 알 수 있듯이 양생 14일 까지는 뚜렷한 강도의 증가를 보이고 있으며 이후로 양생 28일 까지는 약간의 증가를 나타내고 있다 양생 28일 강도에 비해 양생 3일의 강도는 화강토 사용 시 33%~38%수준이며 봉적도는 46%~52%수준으로 양생에 따른 일축압축강도의 증가는 기존의 김병일 등(2003)의 연구와

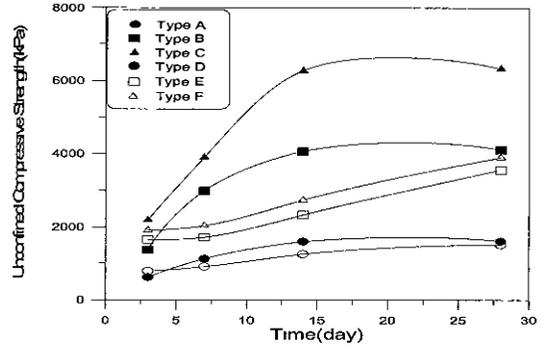


Fig 4 소일시멘트의 일축압축강도 경시변화

비슷한 추세를 보이며 주사전자현미경 사진에서도 이러한 강도증가에 대한 사실을 잘 뒷받침해주고 있다

4.2 동적반복재하 크리프 변형률

Fig 5는 60.0kPa의 정현파 응력 재하 시 발생된 각각의 주파수에서의 시간-변형률 관계도이며 각 주파수마다 5개의 시편을 제작하였다 하중재하 지속시간은 1시간이며 1사이클 당 변형률은 10점 이상 측정하여 컴퓨터에 자동저장 하였다 0.01Hz에서의 시험은 적용응력이 대부분 시료에 재하 되었으나 0.05Hz와 0.2Hz에서는 1사이클의 하중이 재하 되는 동안에 다음 사이클의 하중이 재하 되어 원하는 축력이 모두 재하 되지 않았다 이는 본 연구에 사용된 장비적인 제약의 문제이며 1Hz에서도 시험을 실시하였으나 측정 자료로 사용하기에는 자료의 신뢰성에 문제가 있어 본 연구에서는 제외하였다 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 증가하는 시간의존거동을 보이고 있다

Table 4 양생에 따른 평균일축압축강도(kPa)

배합 분류	평균 일축 압축 강도(kPa)				시멘트 비율
	양생 3일	양생 7일	양생 14일	양생 28일	
Type-A	616.8	1123.7	1596.5	1614.0	4%
Type-B	1374.8	2987.1	4061.9	4108.2	8%
Type-C	2193.7	3989.3	6274.3	6323.4	10%
Type-D	783.9	904.4	1253.7	1510.0	4%
Type-E	1652.9	1716.0	2335.4	3559.8	8%
Type-F	1908.6	2037.2	2739.6	3894.7	10%

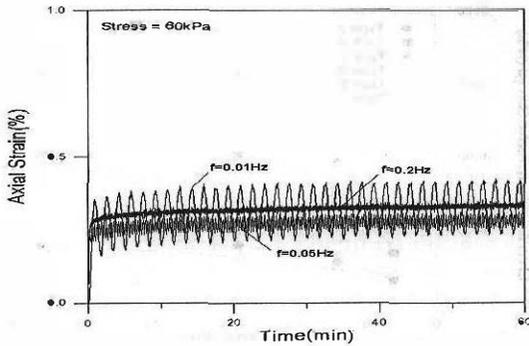


Fig. 5 주파수에 따른 시간과 크리프 변형률 관계

5. 결과분석 및 고찰

5.1 주사전자현미경분석

흙에 시멘트를 첨가하는 경우, 화학적 반응에 의하여 원 시료의 입자형상을 변화시키게 된다. Fig. 6은 화학적 반응으로 인한 입자형상의 변화를 관찰하기 위하여 재령에 따라 3000배로 확대 촬영한 결과이다. Fig. 6(a)는 양생 3일이 지난 시료의 촬영결과로 시멘트가 녹아 들어가 강알칼리성 용액의 침식작용에 의해 토립자 표면에 흡착성 물질의 층이 생긴 것이며,

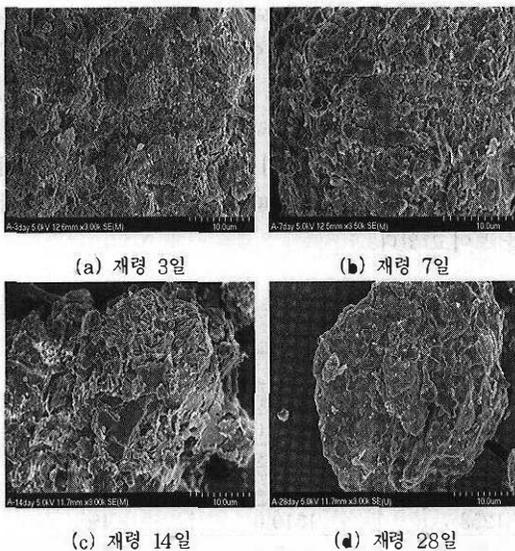
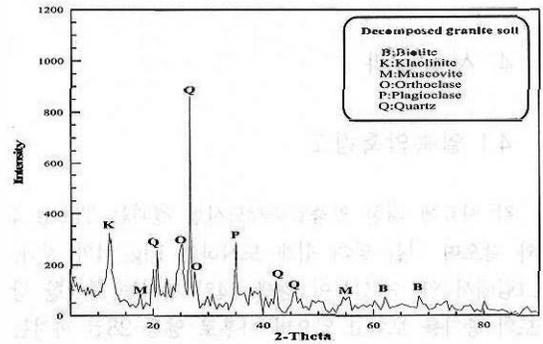


Fig. 6 소일시멘트의 SEM 촬영 결과

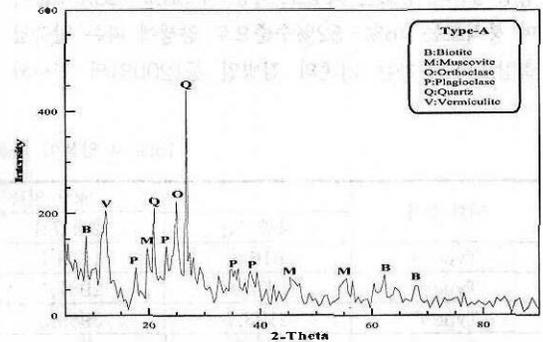
Fig. 6(d)은 양생 4주 후의 시료에 대한 촬영결과이다. 수화반응생성물이 발생되었으며 동시에 점토 입자 등의 미세입자 틀레의 시멘트입자는 수화반응을 일으켜 간극이 채워지도록 성장해 나간다. 이는 토립자가 외력에 의해 쉽게 이동하는 것을 막아 토립자가 부동으로 자리를 잡도록 한 것이며 이러한 결과는 시멘트 혼합량이 많을 수록 증가되는 것을 알 수 있다. (Handy, 1958)

5.2 X선 회절분석

Fig. 7은 원시료(화강토)와 재령 7일의 소일시멘트에 대하여 XRD 분석을 실시하여 반응생성물을 확인하였다. 분석 결과 화강토는 주 구성광물인 석영, 사장석, 흑운모 등이 주로 검출되었으며 소일시멘트의 반응생성물로는 Vermiculite가 발견되었다.



(a) 화강토



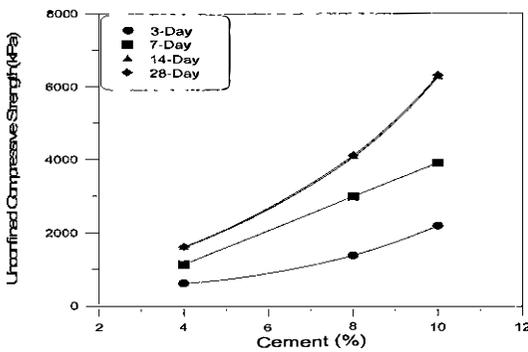
(b) 소일시멘트(재령7일)

Fig. 7 XRD 분석결과

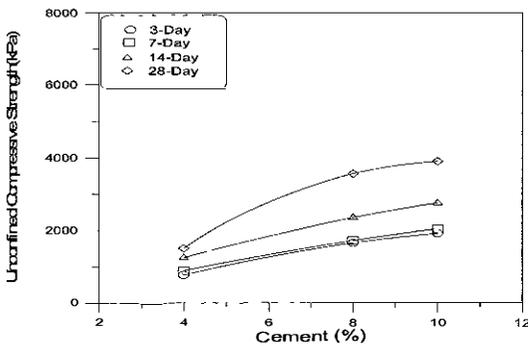
이는 전형적으로 흑운모의 변질작용에 의해 생성된 것으로 수화 반응에 의한 화학반응이 일어나면서 원 시료의 광물이 변화된 것이며 시멘트의 첨가량이 증가할수록 반응생성물이 증가함을 알 수 있었다

5.3 시멘트량이 일축압축강도에 미치는 영향

Fig. 8은 재령에 따른 시멘트 함량이 4%, 8%, 10%일 때의 강도변화를 도시한 것이다 화강토와 봉적토 모두 시멘트 함량이 증가할 수록 일축압축강도가 커지는 것을 알 수 있다. 양생 28일의 경우 화강토는 시멘트함량 4%에 비해 10%에서의 강도증가가 약 3.9배이며 봉적토의 경우는 약 2.6배의 강도 증가를 나타내었다



(a) 화강토



(b) 봉적토

Fig 8 시멘트 함량에 따른 강도 변화

5.4 세립분 함량이 일축압축강도에 미치는 영향

Fig 9는 시멘트 함량이 8%인 시료에 대해 세립분 함량에 따른 강도의 변화를 도시한 것이다 그림에서 알 수 있듯이 세립분 함량이 33.9%인 봉적토에 비해 세립분이 11.7%인 화강토에서 강도 증가가 더 뚜렷하였으며 재령 28일의 경우 화강토에 비해 세립분이 많은 봉적토의 일축압축강도는 약 87%수준으로 세립분이 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 보였다.

5.5 소일시멘트의 동적특성

Fig 10은 소일시멘트에 정현파의 응력재하 시 각각의 주파수(0.01Hz, 0.05Hz, 0.2Hz)에 따른 응력-변형률 이력곡선을 나타낸 것이다 선형중첩의 원리를

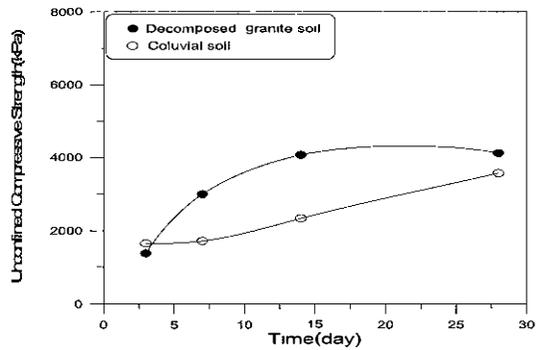


Fig 9 세립분 함량에 따른 강도변화(8%)

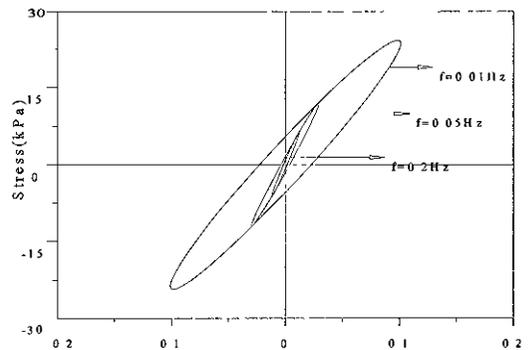


Fig 10 주파수에 따른 응력 변형률 이력곡선

이용하였으며 재료의 점성 성질 때문에 그림에 나타난 바와 같이 타원체의 응력 변형을 이력곡선이 얻어지며 정현파의 응력과 변형률은 식 3와 식 4로부터 각각 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 히스테리시스곡선의 기울기가 점점 크게 변하였다 이는 복합전단계수 G^* 의 크기가 주파수에 따라 증가 하고 있음을 의미하며 복합전단컴플라이언스 J_a^* 는 반대로 감소하고 있다는 것을 뜻한다 이러한 각각의 히스테리시스곡선으로부터 동적특성을 구하였으며 Table 5에 나타내었다

Fig 11은 주파수에 따른 최대변형률 ϵ_0 의 크기를 나타낸 것으로 가로축은 주파수를 로그로 나타내고 세로축은 최대변형률을 도시하였다 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 최대 변형률은 감소하는 경향을 보이고 있다 또한 Fig 12는 주파수에 따른 위상각 δ 의 변화를 나타낸 것으로 이 또한 주파수의

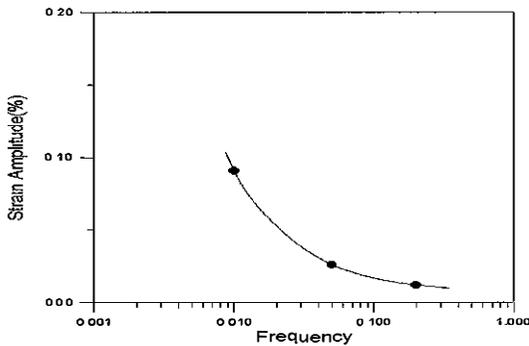


Fig 11 주파수에 따른 변형률의 변화

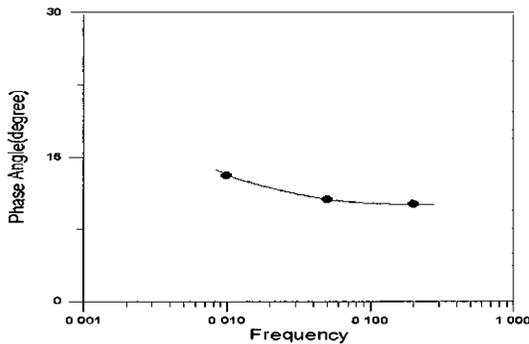


Fig 12 주파수에 따른 위상각의 변화

Table 5 재료의 동적특성

Properties	0 01 Hz	0 05 Hz	0 2 Hz
δ	13 1°	10 6°	10 1°
G^*	294 3	457 6	587 5
$G_{a1}(w)$	286 7	449 9	578 4
$G_{a2}(w)$	66 5	84 2	103 0
J_a^*	0 00339	0 00218	0 00170
$J_{a1}(w)$	0 00331	0 00215	0 00167
$J_{a2}(w)$	0 00077	0 00040	0 00030

증가에 따라 감소하였다 Fig 13는 복합전단컴플라이언스의 크기 J_a^* 와 보존컴플라이언스 $J_{a1}(w)$, 손실컴플라이언스 $J_{a2}(w)$ 을 나타낸 것으로 주파수가 증가함에 따라 감소하였다 또한, Fig 14는 식 7에서 구한 복합전단계수를 도시한 것으로 주파수가 증가함에 따라 증가하고 있다

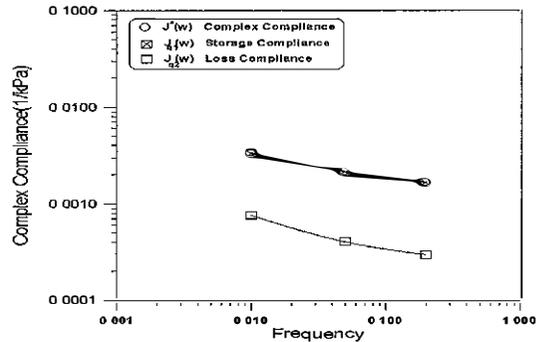


Fig 13 주파수에 따른 복합전단컴플라이언스의 변화

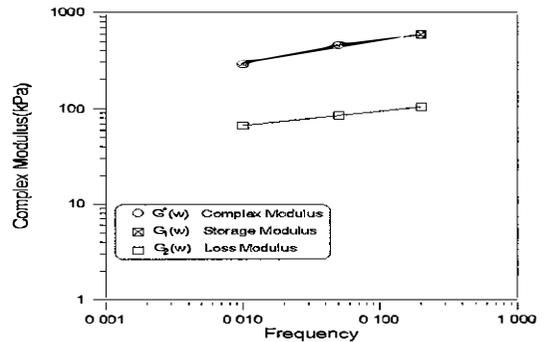


Fig 14 주파수에 따른 복합전단계수의 변화

그림에서 복합계수의 실수부에 해당하는 $G_1(w)$ 는 보존계수로서 탄성성분이며, 허수부에 해당하는 $G_2(w)$ 는 손실계수인 점성부분으로 주파수의 증가에 따라 역시 증가하는 추세를 보였다

5.6 동적특성으로부터 Creep Compliance 예측

응력과 변형률이 시간의 정현파의 함수 일 때 복합 컴플라이언스를 다음과 같은 함수로 표현할 수 있다

$$J_{q1}(w) = \omega \int_0^{\infty} J_q(t) \sin \omega t \, dt \quad (11)$$

$$J_{q2}(w) = \omega \int_0^{\infty} J_q(t) \cos \omega t \, dt \quad (12)$$

또한, 위의 식을 역Fourier 변환을 써서 정리하면 식 13과 식 14와 같다. (Davies 등, 1979)

$$J_q(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{J_{q1}(w)}{w} \sin \omega t \, d\omega \quad (13)$$

$$J_q(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{J_{q2}(w)}{w} \cos \omega t \, d\omega \quad (14)$$

식 15와 같은 지수함수를 적용하여

$$J_q(t) = a + b t^c \quad (15)$$

정리하면 $J_{q1}(w)$, $J_{q2}(w)$ 그리고 위상각 δ 는 다음과 같이 된다

$$J_{q1}(w) = a + b \Gamma(c+1) w^{-c} \cos \frac{c\pi}{2} \quad (16)$$

$$J_{q2}(w) = b \Gamma(c+1) w^{-c} \sin \frac{c\pi}{2} \quad (17)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{b \Gamma(c+1) \sin \frac{c\pi}{2}}{a \omega^c + b \Gamma(c+1) \cos \frac{c\pi}{2}} \right] \quad (18)$$

여기서, $\Gamma(c+1)$ 는 $c+1$ 의 감마함수이다.

각각의 주어진 주파수에 대해 $J_{q1}(w)$ 과 $J_{q2}(w)$, 그리고 위상각 δ 을 알고 있으면 점탄성 크리프 함수의 재료상수 a, b, c 는 다음과 같은 과정을 통해 구할 수 있다

1) $\log J_{q2}(w)$ 와 $\log w$ 의 그래프로부터 회귀분석을 통해 c 값을 구한다.

2) c 값을 알게 되면 각 주파수에 따른

$A(w) = \Gamma(c+1) w^{-c} \cos(c\pi/2)$ 을 구한 후 $J_{q1}(w)$ 와 $A(w)$ 을 플로팅 한다.

3) $J_{q1}(w)$ 와 $A(w)$ 의 그래프의 회귀분석을 통해 재료상수 a, b 를 구한다

$$A(w), J_{q1}(w) = a + bA(w)$$

이상의 과정을 통해 본연구의 실험결과에 대한 예측 점탄성 재료상수를 구하면 $a = 1.31 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$, $b = 7.38 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, $c = 0.317$ 이 되며 이렇게 구한 지수함수식에 적용응력을 곱하여 시험 값과 비교하면 약간의 오차가 발생되는데 그 차가 소성변형률 (0.096%)이며 이를 고려하여 예측 값과 시험 값을 비교하면 Fig 15와 같다

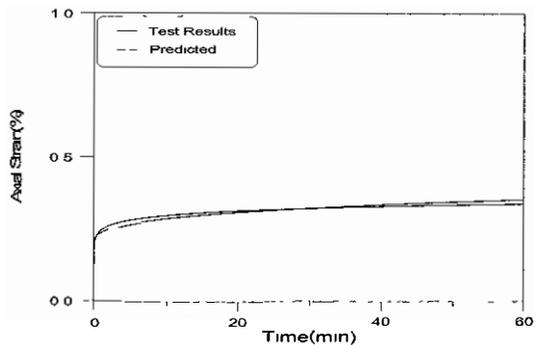


Fig 15 재료의 동적특성으로부터 크리프 예측

6. 결 론

참고문헌

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- 1) 일축압축강도시험 결과 재령에 따른 압축강도의 증가는 재령 14일 까지 뚜렷한 강도증가를 보인 후에 재령 28일까지 완만한 증가추세를 나타냈다. 양생 28일 강도에 비해 양생 3일의 일축압축강도는 화강토 사용 시 33%~38%, 붕적토는 46%~52%수준으로 양생일수와 시멘트 함량이 증가할수록 강도는 증가하였으며 미 세립분이 많이 포함될수록 압축강도는 감소하는 경향을 보였다
- 2) 주사전자현미경(SEM)분석 결과 양생일수가 증가함에 따라 수화반응을 일으켜 간극이 채워지는 과정을 확인 할 수 있었다. X선 회절분석결과 수화 이전의 화강토에서 관찰되지 않았던 반응생성물인 Vermiculite가 소일시멘트에서 발견되었으며 시멘트 함량이 증가할수록 반응생성물도 증가한 것으로 나타났다
- 3) 동적반복재하크리프시험의 시간-변형률 곡선으로부터 타원체의 응력-변형률 이력곡선을 구하였으며 주파수의 증가에 따라 이력곡선의 기울기는 증가하였다
- 4) 응력-변형률 이력곡선에서 복합전단계수와 위상각을 구하였으며 주파수가 증가함에 따라 최대변형률은 감소하였고 위상각 δ 는 $13.1^\circ(0.01\text{Hz})$ 에서 $10.1^\circ(0.2\text{Hz})$ 로 감소하는 경향을 보였다 또한, 복합전단계수의 크기 $G^*(\omega)$ 는 증가한 반면 복합전단컴플라이언스 크기 $J^*(\omega)$ 는 감소하였다
- 5) 재료의 동적특성으로부터 크리프 컴플라이언스 $J_c^*(t) = a + bt^c$ 의 지수함수를 예측할 수 있었으며 실측값과 비교함으로써 제하시험을 하지 않아도 소성 변형률의 예측이 가능하였다

- 1 강회복, 김종렬, 서성호, "동적반복재하크리프 시험에 의한 약액 주입 사질 고결토의 점·탄소성 거동해석", 대한토목학회논문집, 제22권 제3-C호, 2003, pp 151-158
2. 김병일, 김영옥, 이승현, "NSC를 첨가한 소일시멘트의 일축압축강도", 한국지반공학회 논문집, 제18권 4호, 2002, pp 159-165
- 3 김병일, 위성혁, 이승현, 김영옥, "무기질 교화제를 첨가한 소일시멘트의 강도 특성", 대한토목학회 논문집, 제22권 제3-C호, 2003, pp 135-141
- 4 Davies, B and Martin, B, "Numerical inversion of the Laplace transforms a survey and comparison of methods", J Computational Pyhs., Vol. 33, 1979 pp 1-32
- 5 Handy, R L, "Cementation of Soil Minerals with Portland Cement or Alkalis", H R B Bulletin 192, 1958, pp.54-64
- 6 Highway Research Board, "Soil Stabilization with Portland Cement", H.R.B. Bulletin 292, 1961, pp 212
- 7 Y Sawaragi & H. Tokumaru, "On fundamental equation of the dynamical behaviour of nonlinear viscoelastic bodies", Memoir of Fac Eng Kyoto Univ, 16, 1954, pp 100-111

(접수일자 · 2004년 5월 13일)