

양생조건에 따른 유기계 폴리머 흙 포장의 특성

Characteristics of Organic Polymer Soil Pavement Curing Condition

황 성 필¹⁾ · 정 재 형[†] · 이 용 수¹⁾ · 류 상 훈¹⁾

Sungpil Hwang · Jaehyeung Jeoung · Yongsoo Lee · Sanghun Ryu

Received: August 6th, 2014; Revised: August 12th, 2014; Accepted: October 30th, 2014

ABSTRACT : The efforts to reduce carbon emission have been made in many aspects and in road, the study to develop the construction method which will replace asphalt and cement is also underway. But given the low cost and high performance offered by cement, among many solidification agents, it's difficult to seek the competent alternative. Polymeric material has been used in various ways for its advantages including lightweight and easy process for complex function and generates less carbon emission, and thus it would possibly be efficient if it replaces soil pavement using cement. This study, using three different types of organic polymeric solidification agents with different solidification principle, is intended to identify the difference in strength depending on curing method, natural dry or oven dry. Applicability of organic polymeric solidification agents to walkway and bike lane was investigated and as a result of unconfined strength test, all of them satisfied the minimum strength requirements of bike lane. Furthermore, strength characteristics of soil pavement depending on variation of water content was evaluated to identify the relationship, thereby appropriate curing method using organic polymeric solidification agent is proposed.

Keywords : Organic solidification agent, Soil pavement, Strength characteristics, Drying condition

요 지 : 탄소배출을 줄이기 위해 각 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있고, 도로분야에서도 아스팔트 및 시멘트를 대체하는 공법을 개발하기 위하여 노력하고 있다. 그러나 고화제 중에서 시멘트는 가격이 저렴하고 성능이 우수하여 이를 대체하기에 어려운 실정이다. 고분자 재료는 가벼우면서도 복합기능을 추가할 수 있도록 가공이 쉬워서 여러 가지 용도로 사용되고 있으며, 제조공정에서 탄소배출이 적어서, 시멘트를 이용한 흙 포장을 대체한다면 그 효과가 크다. 본 연구에서는 고화 원리가 다른 3종류의 유기계 폴리머 고화제를 사용하여 공기 중 양생과 건조로에 의한 양생을 적용하여 양생방법에 따른 강도의 차이점을 파악하였다. 유기계 폴리머 고화제만을 적용하여 산책로 및 자전거도로의 포장에 사용 가능한지를 파악하여, 3가지 종류의 고화제를 적용한 일축압축강도시험에서 모두가 자전거 도로의 최소 소요강도를 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 공시체의 함수비 변화에 따르는 흙 포장체의 강도 특성을 평가하여 상관관계를 제시하고 유기계 폴리머 고화제를 이용한 경우의 적절한 양생방법을 제시하였다.

주요어 : 유기계 폴리머 고화제, 흙 포장, 강도특성, 건조 조건

1. 서 론

일반적으로 도로는 아스팔트 및 콘크리트를 이용하여 포장을 하며, 포장체는 내구성 및 내후성에 대해서 안정적인 공법으로 정착되어 있다. 그러나 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장은 재료의 제조, 운반, 시공 과정에서 탄소배출량이 많은 것으로 알려져 개선이 필요한 상황이다. 1997년 교토의정서 채택 이후 전 세계적으로 저탄소 녹색기술의 개발 및 적용이 주요 현안이 되었으며, 미국, 유럽 등 선진국들은 인증제도를 도입하며 빠르게 대응하고 있어서 우리나라도 이 분야에 대한 연구 및 개발이 시급한 실정이다. 정부에서 2020년 탄소배출량을 배출전망치에서 30 % 감축안을 발표

하고 달성하기 위해 노력을 기울이고 있고(박진호, 2010), 이는 2015년 배출량에서 4 %를 줄여야 달성 가능한 목표로서 사회 전 영역에서 꾸준한 노력이 필요하다.

도로 포장 분야에서는 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장으로 획일화되어있는 우리나라의 상황을 개선하기 위해서 자전거도로, 산책로 등과 같은 특수한 도로의 일부라도 기존의 포장을 대체할 수 있는 방법을 찾고 있다. 흙 포장 공법은 원지반의 흙을 포장재료로 이용하여 운반과정에서 발생하는 탄소배출량이 적고, 단순한 시공방법을 사용함으로써 장비의 사용이 적어서 이러한 사회적 요구에 적합한 공법이라고 할 수 있다. 2010년 국토교통부에서는 자전거 이용시설 설치 및 관리 지침을 만들면서 흙 포장을 포장의

1) Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jjhcivil@kict.re.kr)

한 종류로 정의하였으며, 자전거 도로 등에 적용하여 활용 범위를 넓혀가고 있다.

일반적으로 흙 포장은 흙, 무기계 고화제, 혼합수, 골재 등을 혼합하여 포설 후 전압하여 포장체를 시공하는 방법을 말한다. 무기계 고화제로는 시멘트, 석회, 석고 등이 사용되고 있으며, 사용되는 환경에 따라서 pH를 조절하는 혼화제를 첨가하기도 한다. 고화제 중에서 시멘트는 가격이 저렴하고 성능이 확실하여 가장 많이 사용되고 있지만, 흙 포장체에서 6가크롬이 용출되거나(Ju et al., 2003; Jung et al., 2009) 초기 균열발생이 많이 발생되고, 탄소배출량 증가의 원인인 시멘트를 사용할 수밖에 없는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 제조공정에서 탄소배출이 적은 유기계 폴리머 고화제를 사용하여 흙 포장에 적용함으로써 탄소배출량을 줄이는 동시에 무기계 고화제를 사용한 흙 포장을 대체할 수 있는 가능성을 평가하고자 하였다.

우리나라에서 유기계 폴리머 고화제를 사용한 흙 포장에 대한 연구는 다소 부족한 상황으로서, Lee(2009)의 연구에서는 흙과 시멘트의 혼합물에 유기계 폴리머 고화제인 스티렌-부타디엔 공중합체(일명 라텍스 폴리머)를 첨가하여 일축압축 강도 특성 연구를 수행하였으며, Lee et al.(2010)의 연구에서는 개질 수용성 고분자 첨가에 따른 일축압축강도의 변화를 관찰하고, 휠트레킹 시험을 통하여 차륜하중이 반복적으로 가해졌을 때의 상태를 평가하였다. 이러한 기존 연구에서는 시멘트 성분을 첨가하여 흙 포장에서 유기계 폴리머 고화제 본연의 특성을 파악하지 못한 실정이며, 유기계 폴리머 흙 포장을 체계화하기 위해서 요구되는 유기계 폴리머 고화제 종류에 따른 차이점이나 유기계 폴리머 고화제를 사용할 경우의 적절한 양생방법을 제시하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 유기계 폴리머 고화제 종류에 따른 차이점을 파악하고, 유기계 흙 포장에 적용 가능한 양생 방법을 파악하기 위하여 고화 원리가 다른 3종류의 유기계 폴리머 고화제를 사용하여 몰드에 공시체를 제작하고, 실내 공기 중 양생과 건조로에 의한 양생을 적용하여 양생방법에 따른 강도발현의 차이점을 파악하였다. 그리고 공시체의 함수비 변화에 따르는 흙 포장체의 강도 특성을 평가함과 동시에 흙 포장체의 투수계수를 평가하여 유기계 폴리머 고화제만을 사용한 경우의 흙 포장 공법의 가능성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 흙은 경기도 지역에서 채취된 화강풍화

토이고, 통일분류법(KS F 2324)상 SW에 해당된다. 기본적인 물성은 Table 1에 나타나 있으며, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같고 최적함수비를 포함하는 다짐특성은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 경제적으로 저렴하고 환경 독성이 적어서 흙 포장에 적용가능하며, 흙과의 반응성이 좋은 유기계 고분자 3종류를 선정하여 유기계 흙 포장의 특성을 제시하고자 하였다. 고분자 고화제는 단위체라는 저분자가 여러 개 중합되어 이루어지며 분자량이 5,000~20,000개 정도인 유기물을 말한다. 단위체는 고분자 물질의 기본 성질을 결정하는 입자로서 단위체에 수용성 고분자를 첨가하여 시공성을 확보하게 하는 등 다양한 응용이 가능하다. 고분자 재료는 가벼우면서도 복합기능을 추가할 수 있도록 가공이 쉬워

Table 1. Characteristics of granite soils

Type	Symbol and unit	Characteristics
Specific gravity	G_s	2.59
Maximum dry unit weight	γ_{dmax} (kN/m ³)	19.8
Optimum moisture contents	OMC (%)	9.0
California bearing ratio	CBR	32.0

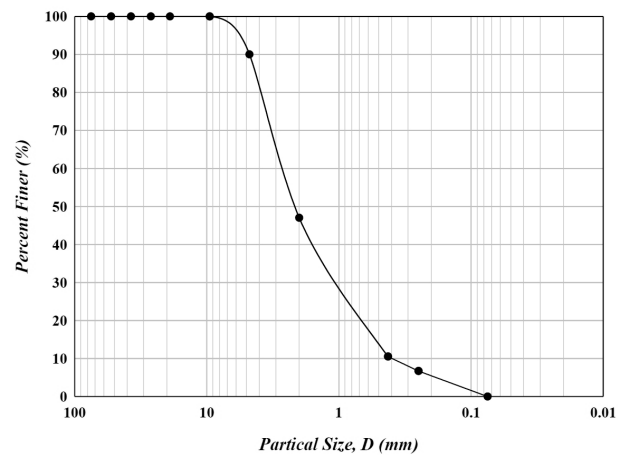


Fig. 1. Particle size distribution of granite soil

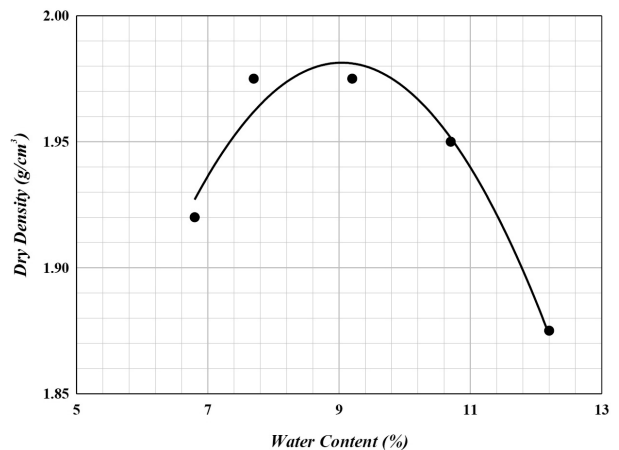


Fig. 2. Compaction test result of granite soil

서 여러 가지 용도로 사용되고 있으며, 지반공학 관련 분야에서는 수분 흡수 기능, 접착기능 및 점도조절 기능으로 많이 사용하고 있다.

Lee et al.(2012)의 연구에 의하면, 흙 포장에 사용된 폴리머는 Fig. 3과 같이 흙 입자 사이의 필름 막을 형성하고 망상구조로 연결되어, 지반의 압축·인장강도 및 부착성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 또한 유기계 폴리머 고화제는 무기계 고화제와 혼합하여 사용할 수 있으며, 시멘트의 수화반응에 영향을 주지 않는 폴리머를 선택하면 폴리머의 반응과 수화반응을 순차적으로 발생시켜 유기, 무기 고화제간의 상생을 유도할 수 있다(Ju et al., 2002). 이러한 의미에서 유기계 폴리머 고화제는 흙 포장 공법에서 발생하는 탄소 배출량을 획기적으로 줄일 수 있으며, 무기계 고화제의 단점을 보완해 줄 수 있는 주요한 재료이다.

본 연구에서는 유기계 폴리머 고화제에 대한 기초 연구로서 부착력이 있는 유기계 폴리머 고화제만을 이용하여 시멘트 등 다른 고화제의 첨가 없이 산책로 및 자전거 도로를 건설할 수 있는지 가능성을 평가하고자 하였으며, 현장시공성이 확보되고 환경 독성이 적은 친수성의 수용성 유기계 고분자 고화제 3종을 유기계 흙 포장의 후보 고화제로 선정하였다. 수화반응에 기반을 두는 무기계 고화제와 다르게 유기계 폴리머 고화제는 고화 원리가 다른 많은 종류의 재료가 적용될 수 있으므로, 본 연구에서는 고화 원리가 다른 대표적인 물질을 선정하였다. 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머(Vinyl Acetate/Maleate Copolymer with enzymatic wetting agent, 이하 폴리머 1), 스티렌-부타디엔 공중합체(Styrene-Butadiene Copolymer, 이하 폴리머 2)와 아크릴계 접착제(Acryl Ester Copolymer, 이하 폴리머 3)를 사용하였으며, 각각 다른 기본물질을 기본으로 하고 있기 때문에 고화 원리가 다르지만 흙 포장 시공 현장에서 동일한 작업공정으로 진행할 수 있는 액상 형태의 수용성 재료를 선정하고 시중에서 구입 가능한 제품을 이용하였다. 고화제로 사용된 유기질 폴리머 고화제의 특성은 각 제조사의 물질안전보건자료(MSDS)에 나타난 내용을 Table 2에 나타내었다.

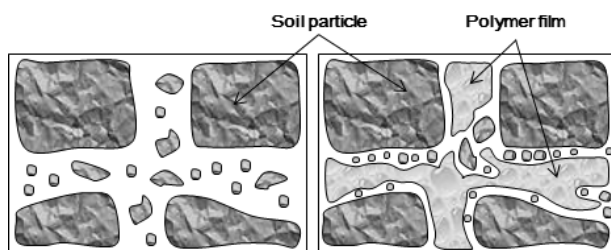


Fig. 3. Constitution of soil pavement

2.2 실험방법

실험에 사용된 화강풍화토는 실내시험의 정밀도를 높이기 위하여 건조로에서 사전에 24시간 건조하여 자연함수비의 영향이 없도록 준비하였으며, 유기계 폴리머 고화제는 흙 시료 무게의 1.5 %를 첨가하고 공시체 제작 시 최적함수비(9 %)가 되도록 조절하였다. 공시체는 지름 50 mm, 높이 100 mm이며, 강철 몰드에서 A다짐 에너지로 다짐 후 양생하였다. 실내 다짐시험을 수행할 경우에는 대상이 되는 토공구조물의 성격(공항, 도로, 경차전용도로 등)에 따라서 다짐에너지 및 실험방법을 다르게 적용한다. 우리나라의 다짐시험(KS F 2312)은 5가지(A, B, C, D, E)의 실험방법을 제시하고 있으며, A, B 다짐시험은 약 550 kN·m³의 다짐에너지를 적용하고 C, D, E 다짐시험은 약 2,475 kN·m³을 적용한다. A, B 다짐시험은 일반적인 도로 토공의 경우에 사용하고, 비행장 등 사용중이 큰 지반을 다질 때에는 보다 큰 에너지로 시험하기 위해 C, D, E 다짐시험을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 산책로 및 자전거 도로를 대상으로 하고 있으므로 A다짐시험법으로 공시체를 제작하였다.

우리나라에서는 흙 포장의 설계 단계에서 현지토와 고화제의 혼합에 따르는 강도발현 특성을 파악하고 고화제 첨가량을 결정하기 위하여 일축압축시험을 하고 있으나, 양생 과정에 대한 명확한 기준이 정립되어 있지 않아서 고화제 첨가량의 많고 적음과 시공현장 상황을 고려하여 수중양생이나 공기양생을 개별적으로 적용하고 있다. 고화제 첨가량이 많은 경우에는 콘크리트 포장과 같이 수중양생을 적용하고 그렇지 않은 경우는 공기양생을 적용하고 있다.

본 연구에서는 유기계 흙 포장 공법의 적절한 양생방법을 제시하기 위하여 공기 중 양생과 건조로 양생의 2가지 조건으로 실험하였다. 공기 중 양생의 경우에는 온도 섭씨 17도~21도, 습도 30 %~50 %의 실험실 환경에서 3일과 7일 동안 양생하였으며, 건조로 양생의 경우에는 온도 섭씨 105도의 건조로 환경에서 3시간, 24시간의 양생을 하였다. 실험은 3종의 고화제를 사용한 공시체를 공기 중 양생 및 건조로 양생 후 일축압축시험 및 공시체의 함수비를 측정하였

Table 2. Characteristics of binding materials

Type	Polymer 1	Polymer 2	Polymer 3
Color	Ivory white	Ivory white	Ivory white
pH	3	10.5	7
Viscosity (Pa·s)	0.86	0.18	1.0~3.0
Specific gravity	1.08	1.017	1.04
Contents of solid copolymer	54.5 %	47.1 %	56~58 %

으며, 고화제의 혼합비율은 화강풍화토 100 g당 고화제와 물의 무게에 대한 비율로 Table 3에 나타내었다.

유기계 흙 포장체의 강우에 대한 내구성을 파악하기 위하여 공기 중에서 7일간 양생한 공시체에 대하여 투수계수를 측정하였다. 실내에서 투수계수를 측정하기 위해서는 시료의 투수성에 따라서 정수위투수시험(KS F 2322)과 변수위투수시험(KS F 2322)으로 나누어 실시하여야 하며, 본 연구에서는 정수위 투수시험이 적용되었다. 시험의 정밀도를 높이기 위하여 3축 셀을 활용하였으며, 공시체의 측벽에 수압을 가하여 멤브레인으로 구속함으로써 공시체 측면을 따라 발생할 수 물길을 차단하고 투수계수를 측정하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 양생조건에 따른 강도 특성

기존 연구에서 폴리머의 첨가는 압축 및 인장강도, 부착 성능, 지지력 등을 향상 시키는 것으로 보고하였으나, 특정 고화제 한 종류만을 평가한 것으로 일반화하기에는 부족한 부분이 있었으며 본 연구에서는 고화 특성이 다른 3가지 유기계 폴리머 고화제에 대하여 강도발현 특성과 변형 특성을 파악하였다.

양생조건에 따라서 공시체의 일축압축강도를 비교하였으며 Table 4와 Table 5에 나타내었다. 공기 중 양생의 경우

Table 3. Mixing ratio

Type	Mixing ratio		
	Binding material (g)	Water (g)	Granite soils (g)
Polymer 1	1.5	7.5	100
Polymer 2			
Polymer 3			

Table 4. Unconfined compressive strength and water content (Natural drying)

Type		Natural drying time	
		3 Day	7 Day
Polymer 1	Unconfined compressive strength (kPa)	2,450.0	3,120.0
	Water content (%)	0.7	0.5
Polymer 2	Unconfined compressive strength (kPa)	1,110.0	2,700.0
	Water content (%)	1.16	0.64
Polymer 3	Unconfined compressive strength (kPa)	790.0	1,580.0
	Water content (%)	1.19	0.6

에 고화제의 강도발현 특성을 파악하면 폴리머 1에서는 3일 동안 일축압축강도가 2,450 kPa까지 증가하였으며, 7일간 양생 일축압축강도 3,120 kPa의 78 %까지 증가한 것으로서 고화제 제작 후 초기 3일 동안 급격한 반응으로 고화됨을 알 수 있었다. 폴리머 2에서는 3일 동안의 일축압축강도가 1,110 kPa로서 7일간 양생 일축압축강도 2,700 kPa의 41 %까지 증가하였으며, 폴리머 3에서는 3일 동안의 일축압축강도가 790 kPa로서 7일간 양생 일축압축강도 1,580 kPa의 50%까지 증가하였다.

건조로에서 양생한 경우에 고화제의 강도발현 특성을 파악하면 폴리머 1에서는 3시간 동안 일축압축강도가 1,170 kPa로 증가하였으며, 24시간 양생 일축압축강도 3,460 kPa의 34 %까지 증가하였다. 폴리머 2에서는 3시간 동안의 일축압축강도가 280 kPa로서 24시간 양생 일축압축강도 1,683 kPa의 17 %까지 증가하였으며, 폴리머 3에서는 3시간 동안의 일축압축강도가 237 kPa로서 24시간 양생 일축압축강도 2,099 kPa의 11 %까지 증가하였다.

공기 중 양생과 건조로 양생에서 폴리머 1의 경우에 초기 강도 발현 속도가 폴리머 2와 3의 경우보다 빠른 것으로 나타났다. 이것은 폴리머 1이 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머(Vinyl Acetate/Maleate Copolymer with enzymatic wetting agent)를 원료로 하고 있어서 수분이 건조 또는 휘발됨에 따라 직접적으로 고화되는 성질을 가지고 있기 때문에 반응이 빠르게 진행된 것으로 파악된다. 반면에 스티렌-부타디엔 공중합체(Styrene-Butadine Copolymer, 폴리머 2)는 온도 냉각에 의하여 고화되고, 아크릴계 고화제(Acryl Ester Copolymer, 폴리머 3)는 발열반응을 통하여 고화되기 때문에 본 실험에서 적용한 흙 포장 양생방법은 최적의 조건이 아니었기 때문에 강도도 낮고 발현에 시간이 소요되었던 것으로 나타났다.

유기계 폴리머 고화제의 형태의 차이가 강도발현의 특징

Table 5. Unconfined compressive strength and water content (Using drying oven)

Type		Drying time in a drying oven	
		3 Hour	24 Hour
Polymer 1	Unconfined compressive strength (kPa)	1,170.0	3,460.0
	Water content (%)	1.1	0.2
Polymer 2	Unconfined compressive strength (kPa)	280.0	1,683.0
	Water content (%)	2.0	0.3
Polymer 3	Unconfined compressive strength (kPa)	237.0	2,099.0
	Water content (%)	2.0	0.4

으로 나타났으며, 원리적으로 수분 건조 또는 수분 휘발 특성을 가지고 있는 폴리머 1에서 초기 강도증가가 빠르게 나타난 것으로 나타났다. 폴리머 1보다 상대적으로 저렴한 폴리머 2, 3의 경우에서 일반적인 흙 포장 양생방법을 적용하면, 강도 및 초기 강도 발현 특성이 좋지 않은 것으로 나타

나 반응을 촉진시킬 수 있는 첨가제를 개발하거나 고화제의 특성을 반영한 설계와 시공이 필요하였다.

건조조건에 따른 유기계 고화제의 변형특성을 파악하기 위해 각 조건에 따른 응력-변형률 그래프를 Fig. 4~Fig. 9에 나타내었다. 일반적으로 시멘트 및 석회 등을 사용하여

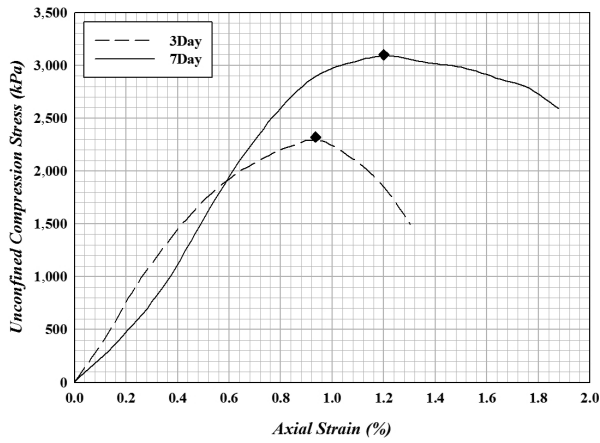


Fig. 4. Stress variation of the specimen with Polymer 1 (Natural drying)

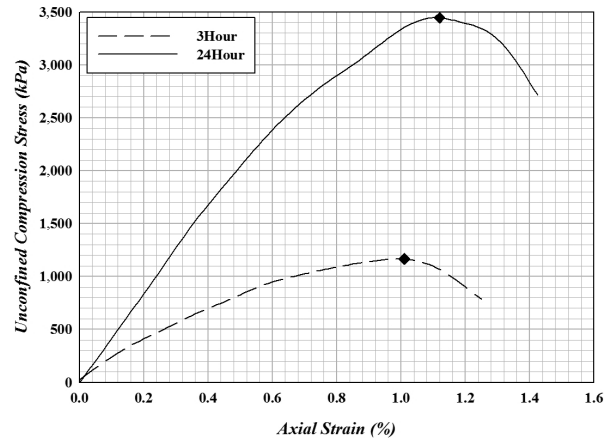


Fig. 7. Stress variation of the specimen with Polymer 1 (Using drying oven)

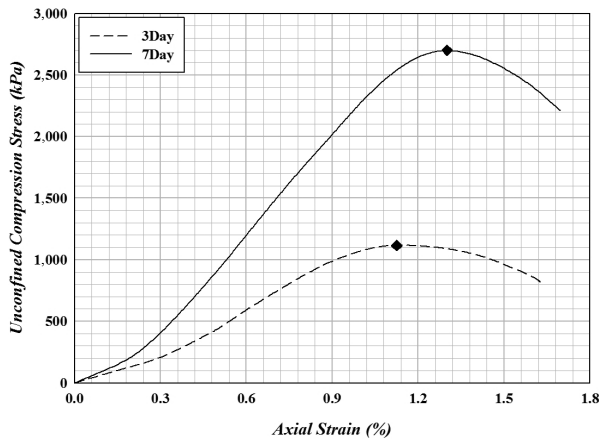


Fig. 5. Stress variation of the specimen with Polymer 2 (Natural drying)

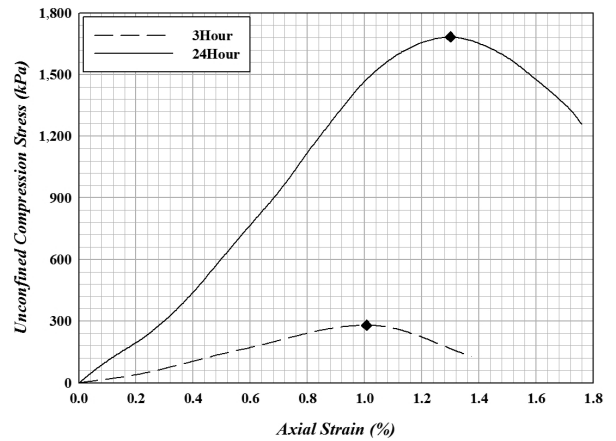


Fig. 8. Stress variation of the specimen with Polymer 2 (Using drying oven)

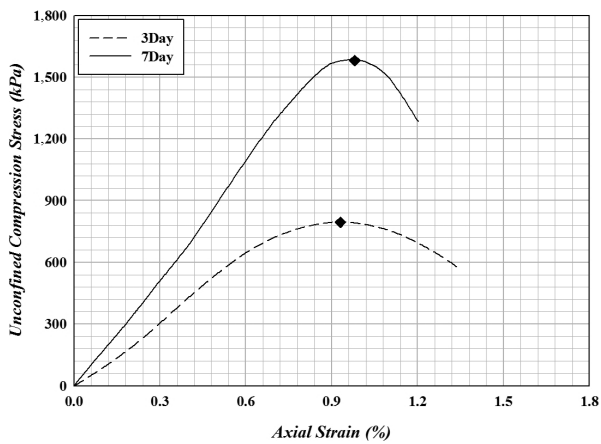


Fig. 6. Stress variation of the specimen with Polymer 3 (Natural drying)

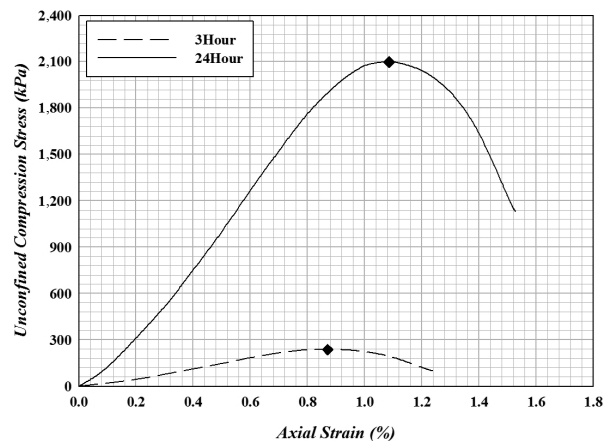


Fig. 9. Stress variation of the specimen with Polymer 3 (Using drying oven)

고화 처리한 고화토는 일축압축강도가 증가하면 파괴 시 변형률이 줄어드는 경향을 가지고 있다. 그러나 폴리머 1, 2, 3에서 일축압축강도가 증가 되면서 변형률도 함께 증가하는 경향을 나타내었으며, 건조로에서 양생한 경우와 공기 중 양생한 경우에서 동일한 결과를 나타내었다. 유기계 폴리머를 고화제로 사용한 경우에 파괴 시 변형률과 일축압축강도가 같이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 양생에 의하여 압축강도와 인장강도가 동시에 증가하는 것으로 파악된다. 폴리머 3의 경우에는 폴리머 1, 2의 결과보다 상대적으로 낮은 일축압축강도에서 파괴되었으며, 파괴 시 변형률 또한 낮게 나타나서 폴리머 3을 흙 포장에 적용할 경우에는 흙 포장 포장체에 균열이 폴리머 1, 2의 경우보다 빨리 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

흙 포장을 산책로 및 자전거 도로에 적용하는 경우에는 흙 포장체의 강도를 일반 차량의 교통하중을 기준으로 정하지 않으며, 보수용 트럭(1 tonf)의 통행을 상정하여 설계하고 있다. 일본 토목연구소(PWRI, 2009)에서는 0.3 MPa~0.7 MPa을 제시하고 있으며, Lee(2012)의 연구에서는 1.55 MPa을 제시하고 있어서 24시간 건조로에서 양생한 경우와 7일간 공기 중 양생한 경우의 일축압축강도로 판단하면, 본 연구에서 사용한 3가지 유기계 폴리머 고화제 모두가 산책로 및 자전거 도로의 강도기준을 만족하는 것으로 나타나 유기계 폴리머 고화제만으로 흙 포장 공법의 적용이 가능할 것으로 파악되었다. 그러나 유기계 폴리머 고화제의 종류에 따라서 초기 강도 발현이 늦거나 적은 변형에도 상대적으로 쉽게 파괴되는 단점도 파악되어 흙 포장에 적용하였을 때 문제점을 유기계 폴리머 고화제 마다 사전에 조사하여야 하고, 반응을 조절할 수 있는 첨가제의 개발도 필요할 것으로 파악되었다.

3.2 양생시간별 함수비 및 강도 특성

흙 포장체의 양생기간 동안의 함수비와 일축압축강도의 변화를 동시에 추적하면 고화제의 강도 발현 메커니즘을 파악할 수 있다.

공기 중 양생한 경우의 일축압축강도시험 결과와 공시체의 함수비를 Table 4에 나타내었으며, 7일간 공기 중 양생한 경우의 공시체의 함수비는 0.5%~0.6%였다. 공기 중에서 양생한 경우에 3가지의 유기계 폴리머 고화제를 사용한 공시체 모두에서 양생 기간의 경과에 따라 함수비가 감소하였으며, 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 시멘트 및 석회 등을 사용하는 경우에는 고화제의 Ca 성분이 물과 반응하여 새로운 수화물이 생성되는 수화반응 때문에 수분이 충분히 공급된다면, 양생 기간의 경과에 따라 공시체

의 수분이 감소하고 생성된 수화물의 양이 증가하여 흙 입자들을 연결함으로써 고화체의 강도가 증가된다. 그러나 유기계 폴리머 고화제를 사용한 경우에는 강도 발현 수화반응이 없기 때문에 양생 기간의 경과에 따라 함수비가 감소하고 일축압축강도가 증가한 것은 각 유기계 폴리머 고화제의 고화 반응 특징에서 원인을 검토하여야 한다.

앞에서 설명한 것과 같이 폴리머 1은 수분의 증발에 의하여 고화되는 특성을 가지고 있어서 공기 중 양생에 따르는 함수비의 감소가 가장 크게 나타났으며, 함수비의 감소가 강도의 증진으로 나타났다. 그러나 폴리머 2의 기본재료는 온도냉각에 의해서 고화되고, 폴리머 3은 기본재료가 발열반응에 의하여 고화됨에도 불구하고 본 연구의 결과와 같이 양생 기간의 경과에 따라 함수비가 감소하는 것은 고화제 분자들을 안정시키기 위하여 첨가된 수용성 고분자의 영향으로 파악된다. 수용성 고분자에 결합되어 있던 수분이 증발한 후 폴리머 단위체간의 결합반응이 발생되어 고화되기 때문에 폴리머 1과 같이 양생 기간의 경과에 따라서 함수비가 감소하고 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 폴리머 2와 폴리머 3에서는 수분증발과 고화 반응이 순차적으로 일어나기 때문에 폴리머 1보다는 일축압축강도의 증가속도가 늦은 것으로 나타났다.

건조로에서 양생한 경우의 일축압축강도시험 결과와 공시체의 함수비를 Table 5에 나타내었으며, 24시간 건조로에서 양생한 경우의 공시체의 함수비는 0.2%~0.4%였다. 공기 중에서 양생한 경우와 마찬가지로 건조로에서 양생한 3가지의 유기계 폴리머 고화제 모두에서 양생 기간의 경과에 따라 공시체의 함수비가 감소한 것으로 나타났으며, 폴리머 1은 함수비의 감소가 가장 크게 나타났다.

공시체의 일축압축강도와 함수비를 Fig. 10에 비교하여 나타내면 고화 원리가 다른 3가지의 유기계 폴리머 고화제에 대하여 공시체의 함수비가 고화체의 강도발현에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 공시체 제작 시 함수비 9%에서 함수비 2%까지는 일축압축강도의 증가가 적었으며, 이후 급격한 강도의 증가가 나타났다. 공기 중에서 7일간 양생한 경우의 함수비는 평균 0.6%로 나타났으며, 건조로에서 24시간 양생한 경우의 함수비는 평균 0.3%로 나타나 함수비를 기준으로 판단하면 대부분의 반응이 완료된 것으로 나타났으며, 폴리머 2를 사용한 경우에서 공기 중 7일간 양생한 경우와 건조로에서 24시간 양생한 경우에 함수비는 각각 0.64%와 0.3%로 비슷하지만 일축압축강도의 차이가 다른 2가지 폴리머를 사용한 경우보다 크게 나타났다.

전반적으로 양생조건에 관계없이 공시체의 함수비와 일축압축강도가 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, 기본재료가 친수성인 폴리머 1뿐만 아니라 수용성으로 개질된 폴

리머 2, 3을 사용하여 고화 처리를 한 경우에 공시체 내부 수분의 양이 고화 반응에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 고화 원리가 다른 유기계 폴리머 고화제라 하더라도 수용성으로 개량된 경우에는 공시체의 함수비가 변화가 고화체의 강도 발현에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

흙 포장에서 강도와 함수비의 상관관계를 파악하기 위하여 Fig. 11에 나타내었으며, 3종류의 수용성 유기계 폴리머 고화제를 경기도 지역 화강풍화토에 무게비 1.5 %를 첨가한 경우의 추세선을 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있었다.

$$y = 1318.5 - 1235.3 \ln x \quad (1)$$

여기서 x : 함수비

y : 일축압축강도

시멘트 등의 무기계 고화제를 이용하는 공법을 적용하는 경우에는 수화반응에 의해 강도가 발현되어 산성비 등의 산성용액에 접하지 않으면 장기 내구성이 우수한 장점이 있으나, 양생과정에 많은 노력과 시간이 소요되어 공사기간이 길어지고 현장의 기상에 영향을 받는다. 그러나 유기계 폴

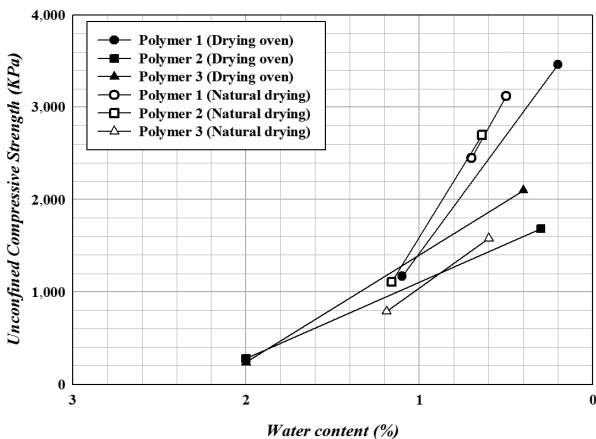


Fig. 10. Strength according to the water contents

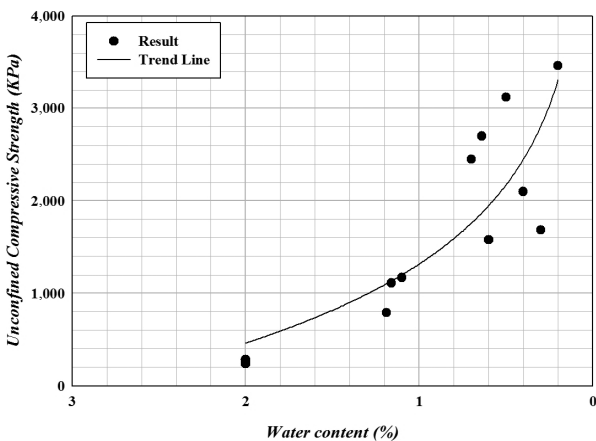


Fig. 11. Trend line of stress variation to the specimen with polymer

리머 고화제는 본 연구에서 나타난 것과 같이 공시체 내부의 수분을 조절함으로써 조기에 강도를 증가시킬 수 있을 것으로 파악되며, 건조로에서 양생한 일축압축강도를 기준으로 현장 배합설계에 적용하거나 흙 포장체 내부의 수분을 빠르게 배출시키는 공법을 도입한다면 공사기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다.

3.3 유기계 고화토의 투수성 평가

강우에 의한 흙 포장체 침투 피해를 파악하기 위해서는 CBR 시험과 투수계수 시험을 적용할 수 있다. CBR 시험은 지지력과 침투를 동시에 고려하는 시험으로서 도로 설계 분야에 넓게 적용되고 있으나, 투수계수 시험이 흙 포장체의 정량적인 물성을 정확하게 파악할 수 있다. 본 연구에서는 흙 포장에 사용된 현지토와 유기계 폴리머 고화제 3종류 첨가로 제작된 공시체에 대하여 7일간 공기 중 양생하여 공시체의 투수계수 변화를 측정하였다. 공시체 제작을 위한 유기계 폴리머 고화제 첨가량은 Table 2와 같으며 시험 결과는 Table 6과 같다.

화강풍화토만으로 공시체를 제작한 경우의 투수계수는 4.9×10^{-4} cm/sec이며, 폴리머 1을 사용한 경우에 투수계수가 3.03×10^{-3} cm/sec, 폴리머 2를 사용한 경우에 투수계수가 2.32×10^{-3} cm/sec, 폴리머 3을 사용한 경우에 투수계수가 5.01×10^{-3} cm/sec로 증가하였다. 일반적으로 시멘트나 석회 등 무기계 고화제를 사용한 경우에는 고화 처리 후에 현지토 보다 투수성이 감소하지만, 유기계 고화제의 경우에는 투수성이 증가하였다. 이것은 유기계 폴리머 고화제의 특성으로 판단되며, 건조에 의하여 흙의 간극에 부착되어 있는 고분자가 수침에 의하여 물과 반응하여 물을 흡수함으로써 공시체 내부의 물의 이동통로를 만든 것으로 판단된다. 폴리머 1, 2 및 3을 사용한 흙 포장체에서 투수계수가 증가하였다고 해서 흙 포장으로서의 적용에 제약이 있는 것은 아니나, 수용성 고분자는 수분의 접촉에 따라 건조와 흡수를 반복하게 되므로 각종 기상상황에 노출되는 상황에 대해서는 장기 현장시험 등으로 정밀한 평가가 추가되어야 할 것으로 나타났다.

Table 6. Hydraulic conductivities of stabilized soils (Natural drying)

Additives	Coefficient of permeability (10^{-4} cm/sec)
Only granite soil	4.90
Polymer 1	30.3
Polymer 2	23.2
Polymer 3	50.1

4. 결 론

3종류의 유기계 폴리머를 사용한 흙 포장에 대하여 양생 조건에 따른 특성을 연구한 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 폴리머 고화제의 종류에 따라서 흙 포장 적용 시에 강도발현의 차이가 나타났다. 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머를 적용한 경우에 초기 강도증가가 빠르게 나타났으며, 투수계수가 다른 2종류의 고화제보다 낮아서 흙 포장에 더 적합한 것으로 나타났다. 스티렌-부타디엔 공중합체와 아크릴계 고화제는 상대적으로 저렴하며, 산책로 및 자전거도로의 최소 소요 강도를 확보하는 것으로 나타나서 반응을 촉진시킬 수 있는 첨가제를 개발하거나 고화제의 특성을 반영한 설계와 시공을 한다면 적용 가능성이 있다고 판단되었다.
- (2) 양생조건 및 폴리머 고화제의 종류에 관계없이 공시체의 함수비와 일축압축강도가 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 친수성인 비닐아세테이트/말레인산염 효소 습제 함유 코폴리머 뿐만 아니라 수용성으로 개질된 스티렌-부타디엔 공중합체, 아크릴계 고화제를 적용한 경우에서 공시체 내부 수분의 양이 고화반응에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 고화 원리가 다른 유기계 폴리머 고화제라 하더라도 수용성으로 개량된 경우에는 공시체의 함수비가 변화가 고화체의 강도 발현에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) 수용성 유기계 폴리머 고화제를 경기도의 화강풍화토에 무게비 1.5 %로 첨가한 경우에 공시체의 함수비와 일축압축강도는 상관관계($y = 1318.5 - 1235.3 \ln x$)가 있는 것으로 나타났다. 시멘트 및 석회와 같은 무기계 고화체에 적용하는 습윤양생을 적용하는 것 보다 흙 포장체의 건조에 중점을 두는 새로운 양생법이 적용될 수 있을 것으로 나타났다.
- (4) 수용성 유기계 폴리머를 고화제로 사용한 경우에 흙 포장체의 투수성이 증가하는 것으로 나타났다. 건조에 의하여 흙의 간극에 부착되어 있는 고분자가 수침에 의하여 물과 반응하여 물을 흡수함으로써 공시체 내부의 물의 이동통로를 만든 것으로 판단된다. 수용성 고분자는

수분의 접촉에 따라 건조와 흡수를 반복하게 되므로 각종 기상상황에 노출되는 상황에 대해서는 장기 현장시험 등으로 정밀한 평가가 필요한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 ‘탄소중립형 도로 기술개발’ 연구단을 통하여 지원된 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2011년 건설기술혁신사업과 한국건설기술연구원의 주요사업인 “지하 굴착 시공 효율성 향상을 위한 신재료 활용 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. 박진호 (2010), 경남의 탄소배출권 거래제 시범사업 방안. 경남발전연구원, pp. 1~5.
2. Ju, J. W., Park, J. B., Ju, J. Y. and Lee, D. S. (2003), Production of soil mixed pavement using hydronium, J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 4C, pp. 213~219 (in Korean).
3. Ju, M. K., Yeon, K. S. and Ohama, Y. (2002), Strength properties of SBR-modified concretes using ground granulated blast-furnace slag, J. of the Korean Concrete Institute, Vol. 14, No. 3, pp. 315~320 (in Korean).
4. Jung, H. S., Jang, C. H., An, B. J. and Chun, B. S. (2009), A study on environmentally friendly soil pavement materials using weathered soil and inorganic binder, J. of Korean Geoenvironment Society, Vol. 10, No. 4, pp. 25~31 (in Korean).
5. Lee, G. H. (2012), Engineering properties and applicability of soil mixed pavement with natural soil stabilizer, Doctorate Thesis, Incheon National University, pp. 10~19 (in Korean).
6. Lee, J. H. (2009), Materials characteristics of soil-cement pavement containing SBR latex, Master's thesis, Kyung Hee University, pp. 9~12 (in Korean).
7. Lee, Y. S., Jeoung, J. H., Yu, J. and Cho, J. W. (2010), The strength characteristics of polymer-cement stabilization, Proc. of 2010 Conf. on Korean Geoenvironment Society, pp. 468~471 (in Korean).
8. Lee, Y. S., Jeoung, J. H., Park, E. H., Ryu, S. H. and Jo, G. T. (2012), Development of road subsoil stabilization technology using multi-complex polymer, Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 33~36 (in Korean).
9. PWRI (2009), Soil pavement handbook, DaeSung, Japan, pp. 1~31.