

바이오폴리머-흙 처리(BPST) 기술의 강도 발현 거동에 대한 주요 영향인자 분석에 관한 연구

Investigation on the Key Parameters for the Strengthening Behavior of Biopolymer-based Soil Treatment (BPST) Technology

이해진* · 조계춘** · 장일한***

Hae-Jin Lee* · Gye-Chum Cho** · Ilhan Chang***

Abstract

Global warming caused by greenhouse gas emissions has rapidly increased abnormal climate events and geotechnical engineering hazards in terms of their size and frequency accordingly. Biopolymer-based soil treatment (BPST) in geotechnical engineering has been implemented in recent years as an alternative to reducing carbon footprint. Furthermore, thermo-gelating biopolymers, including agar gum, gellan gum, and xanthan gum, are known to strengthen soils noticeably. However, an explicitly detailed evaluation of the correlation between the factors, that have a significant influence on the strengthening behavior of BPST, has not been explored yet. In this study, machine learning regression analysis was performed using the UCS (unconfined compressive strength) data for BPST tested in the laboratory to evaluate the factors influencing the strengthening behavior of gellan gum-treated soil mixtures. General linear regression, Ridge, and Lasso were used as linear regression methods; the key factors influencing the behavior of BPST were determined by RMSE (root mean squared error) and regression coefficient values. The results of the analysis showed that the concentration of biopolymer and the content of clay have the most significant influence on the strength of BPST.

Keywords : Biopolymer, BPST, Machine Learning, Linear Regression, Soil Strengthening

1. 서 론

1.1 기후변화로 인한 지반재해

19세기 후반 이후 인간 활동에 의한 온실가스 배출량은 계속해서 증가하고 있다. IPCC(Inter-governmental panel on climate change)의 2021년 6차 평가보고서(Sixth assessment report; AR6)에 따르면 2011년~2020년의 지구 평균 기온이 산업화 이전(1850

년~1900년) 대비 1.09°C 상승하였다. 게다가 현재 온실가스 배출량을 유지한다면 2028년~2034년 사이에 1.5°C 상승이 일어날 것으로 분석하였다.

평균 기온 상승은 지구 물 순환에 영향을 미친다. 예상치 못한 폭우와 가뭄이 빈번히 발생하고 해수면이 상승하며 이로 인해 다양한 지반재해(산사태, 지반 침하, 제방 붕괴, 토양 황폐화, 해안 침식 등)들이 발생된다. 지반재해는 20세기 후반부터 발생 빈도

*아주대학교 건설시스템공학과 대학원생(주저자: gowls0605@ajou.ac.kr)

**한국과학기술원 건설환경공학과 교수

***아주대학교 건설시스템공학과 부교수(교신저자: ilhanchang@ajou.ac.kr)

가 급격히 증가하였고 사회적, 경제적으로 큰 손실을 일으키고 있다(Chang et al., 2019a; Bouwer, 2011).

1.2 기존의 지반보강 방법

지반재해는 약해진 지반의 강도와 관련이 있으므로 지반의 강도를 증진시키는 지반보강 공법들이 주로 연구되어 왔다. 예를 들어, 사면의 강도를 높이고 안정성을 증진하기 위해 옹벽, 토목섬유, 앵커, 쏘일 네일 등이 설치된다. 점토질 지반에서는 화학적 그라우팅을 실시하여 사면의 파괴와 붕괴를 방지한다(Chang et al., 2019a).

지반공학에서 지반보강 공법의 재료로 시멘트가 가장 많이 사용된다. 시멘트는 강도, 내구성, 경제성 측면에서 많은 이점이 있다. 하지만 최근에는 시멘트가 다양한 환경문제(고 pH, 중금속 용출 등)를 야기하는 것으로 알려져 있으며, 특히 CO₂는 배출에 대한 우려가 크다(Chang et al., 2019a). 미국지질조사국(US Geological Survey)에 따르면 전 세계에서 연간 약 4.2G·ton의 시멘트가 생산되고 있고, 시멘트 생산에서 발생하는 CO₂는 전체 CO₂ 배출량의 10%를 차지한다(US Geological Survey, 2019). 또한 지반공학에서 사용하는 시멘트는 전체 CO₂ 배출량의 약 0.2%를 차지하는 것으로 보고된다(Chang et al., 2016a). 따라서 지반공학에서도 기후변화와 CO₂ 배출에 관한 포괄적인 이해가 필요하며 탄소발자국을 줄이기 위한 방안을 모색해야 한다.

1.3 생물학적 지반보강 방법

미생물로 유도된 탄산염침전(Microbial induced calcite precipitation; MICP)은 가장 잘 알려진 생물학적 지반보강 방법 중 하나이다. MICP는 박테리아의 생물학적 대사를 통해 생성된 CaCO₃ 침전을 이용하여 흙의 공학적 특성을 개선한다. 흙 입자 근처에 침전된 탄산염 결정은 인접한 입자 간 결합제로 작

용하여 흙의 강성 및 전단강도를 강화한다(Choi et al., 2020).

또 다른 생물학적 지반개선 방법은 최근 지반공학 분야에서 주목받기 시작한 바이오폴리머 기반 흙 처리(Biopolymer-based soil treatment; BPST)이다. 바이오폴리머는 천연자원에서 생산되는 폴리머로 친환경적이며 주로 식품이나 약품에서 널리 활용됐다(Chang et al., 2015a). 최근 연구에 따르면, BPST는 흙 입자 사이에 수소결합을 형성하여 흙의 전단강도와 압축강도를 증진시키는 효과가 있는 것으로 보고된다(Chang et al., 2015a). 환경 관점으로 봤을 때, 바이오폴리머는 CO₂ 배출량이 거의 없고 자연분해(생분해)가 가능하므로 지반과 지하수 환경에 대한 영향이 없는 재료로 간주되고 있다(Chang et al., 2020).

2. 바이오폴리머-흙 처리 기술

2.1 Biopolymer-based soil treatment (BPST)

바이오폴리머는 다른 생물학적 지반처리 방법보다 강도 발현에 걸리는 시간이 짧고 사용자가 원하는 양과 질을 제어할 수 있다는 이점이 있다. 반면 MICP는 지반 강화를 위한 CaCO₃의 충분한 양이 침전될 때까지 많은 시간과 자원이 소요되며 침전된 CaCO₃의 양은 현장 조건과 때에 따라 다를 수 있다. 하지만 바이오폴리머는 외부(ex-situ) 공간에서 생성될 수 있어 질적·양적 제어가 가능하고 흙 입자와 즉각적인 반응(이온결합)을 통해 강도 증진 효과를 확보할 수 있다(Chang et al., 2020).

지반공학에서 주로 사용하는 바이오폴리머의 종류와 특징을 Table 1에 요약하였다. 흙 처리에 적합한 바이오폴리머 중 젤(gel) 타입 바이오폴리머(gellan gum, agar gum, xanthan gum 등)는 빠른 경화, 생물학적 공극 메움에 의한 투수계수 감소, 흙의 전단 저항 개선, 고유한 하이드로겔(hydrogel) 구조 형성 등과 같은 이점이 있다.

Table 1. Common Biopolymers Used in Geotechnical Engineering.

Biopolymer	Characteristics	Behavior with Soils
Agar Gum	<ul style="list-style-type: none"> • Reversible gelation properties with heating and cooling • Thickening agent 	<ul style="list-style-type: none"> • Strengthening • Pore clogging • Erosion reduction
Guar Gum	<ul style="list-style-type: none"> • High viscosity • Hydration in cold water • Stabilizer/thickener 	<ul style="list-style-type: none"> • Dust control • Strengthening • Grouting
Gellan Gum	<ul style="list-style-type: none"> • Reversible gelation properties with heating and cooling • Thickening agent 	<ul style="list-style-type: none"> • Strengthening • Pore clogging • Erosion reduction
Dextran	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible biopolymer • Lowers permeability in aqueous medium • Emulsifier 	<ul style="list-style-type: none"> • Drilling muds • Conditioners • Erosion reduction
Beta-(1-3)-glucan	<ul style="list-style-type: none"> • Irreversible elastic gel when heated • Used as gelling agent 	<ul style="list-style-type: none"> • Grouting • Strengthening • Superplasticizer in concrete
Xanthan Gum	<ul style="list-style-type: none"> • Increased viscosity • Pseudo-plastic properties 	<ul style="list-style-type: none"> • Drilling mud thickener • Strengthening
Chitosan	<ul style="list-style-type: none"> • No immune reaction • Thickener • Fertilizers 	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulant effects • Removal of heavy metals in water

Source: Chang et al. (2020)

2.2 지반공학에서 바이오폴리머의 적용 및 효과

2.2.1 침식 제어(Soil erosion control)

흙 지반의 표면침식은 지반 공학적으로 중요한 문제일 뿐만 아니라 농업, 기후학, 수문학 그리고 개인의 안전 측면에서도 매우 중요하다. 그러므로 기존의 많은 연구에서 관개 시설 또는 숲을 조성하고 사면을 안정시키는 등의 침식을 제어하기 위한 여러 시도가 있었다(Tongway et al., 2003; Cao, 2008; Agassi and Ben-Hur, 1992). 하지만 이런 전통적인 접근 방법은 적용 횟수에 한계가 있고 경제적으로 비효율적이다(Chang et al., 2020). 게다가 PAM (Polyacrylamide)과 같은 화학적 처리 방법은 환경과 건강에 문제를 일으켜 오늘날에는 그 사용을 제한하고 있다(Kim et al., 2015).

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 MICP(Choi et al., 2020)나 BPST(Chang et al., 2020) 같은 생물

학적인 접근법이 시도되고 있다. 바이오폴리머는 생물학적인 응집, 코팅, 교결 작용 등을 통해 사면 및 댐 구조의 안정성과 표면 침식 저항을 증가시키는 것으로 보고된다(Stabnikov et al., 2015). Fig. 1은 실험실에서 BPST의 침식 반응을 평가한 것으로 BPST가

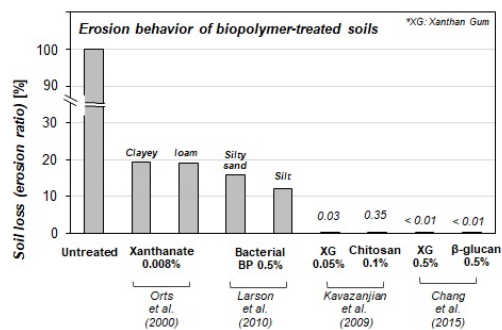


Fig. 1. Erosion behavior of Biopolymer-treated Soils

Source: Orts et al. (2000); Larson et al. (2010); Kavazanjian et al. (2009); Chang et al. (2015)

표면침식을 줄이는 데 효과적인 것으로 나타났다. 특히 xanthan gum, chitosan, β -glucan과 같은 바이오폴리머는 누적 침식 비율이 1% 미만으로 상당한 침식 저항성을 보인다(Chang et al., 2015b).

2.2.2 지반 주입 및 투수계수 제어(Ground injection and permeability control)

바이오폴리머를 그라우팅에 사용하면 시멘트 그라우트의 점도 조절과 재료 분리 방지에 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Sonebi, 2006). 바이오폴리머는 점착력이 있어 시멘트 입자를 고정하기 때문에 블리딩 및 수증분리를 제어한다(Chang et al., 2020). 또한 최근 연구에서 바이오폴리머는 흙의 투수계수 제어 가능성을 보여주고 있어 앞으로 BPST가 그라우팅 재료로서 구현 가능할 것으로 기대된다(Lee et al., 2021).

2.2.3 지반 안정(Earth stabilization)

기존 포장도로는 대부분 아스팔트나 콘크리트 같은 석유 또는 시멘트 기반의 바인더로 시공된다. 도로 포장과 지반 안정에서 지속 가능한 바인더 재료를 찾기 위해 생물학적인 기법을 적용하는 시도들이 있었다. 도로 건설에서는 보조기층의 안정을 위해 녹말을 시멘트나 석회의 보조 첨가제로 사용하였다(Peralta et al., 2012). 또한, 노상 포장의 강도 증진과 안정화를 위해 효소가 제안되었고(Venkatasubramanian and Dhinakaran, 2011) 지하 토양의 안정화에 MICP의 적용 가능성이 제안되었다(DeJong et al., 2010).

바이오폴리머 역시 지반 안정과 도로 공학 측면에서 연구되어왔다(Lee et al., 2019). 최근 연구에서 젤 타입 바이오폴리머(xanthan gum, gellan gum 등)는 모래의 강도를 개선하는 데 효과가 있는 것으로 보고되었으나(Chang et al., 2015a), 반복 습윤 조건에서 내구성 및 강도 저하 등의 문제가 있어 아직 현장 적용이 제한되고 있는 상황이다(Chang et al., 2017; Lee et al., 2019).

2.2.4 식생 증진 효과(Vegetation promotion)

식물이 성장하고 대사하는 데 있어서 물은 필수적이다. 하지만 모래와 같이 수분 보유력이 낮은 토양에서는 식물에 공급된 물이 증산, 배수, 침투 과정에 의해 대부분 손실된다(Sinha, 2004). 실제로 모래질 흙에서 과도한 배수는 뿌리 주변의 물 부족, 식생 성장 방해, 가뭄 조건 초래 등 묘목의 생존과 발아를 제한하는 요소이다(Crous, 2017).

바이오폴리머의 하이드로젤은 친수성 특징을 가지고 있어 모래의 수분 보유 특성을 개선한다(Starkey et al., 2012). Chang et al.(2015b)은 바이오폴리머를 처리한 배양토와 천연 무기질 토에서 종자의 발아와 성장 속도가 무처리 토양에 비해 증가하는 것을 확인하였다. 더 나아가 Tran et al.(2019)는 극심한 단수 조건에서도 바이오폴리머가 물의 손실을 줄여 식물의 생존 가능성을 높이는 것을 확인하였다(Fig. 2).

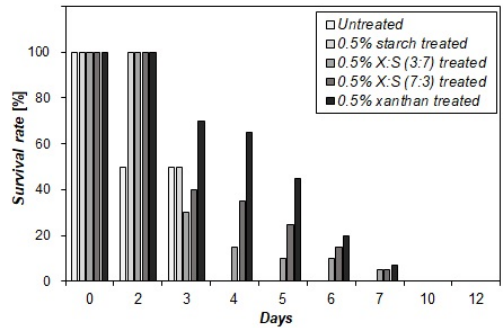


Fig. 2. Effect of Biopolymers on the Survivability of Ryegrass

Source: Tran et al. (2019)

3. BPST의 지반공학적인 거동 특성

3.1 강도 증진 메커니즘

3.1.1 흙의 함수 특성(Soil consistency)

흙은 액성한계(Liquid limit; LL)가 높을수록 액성 지수가 감소하여 일반적으로 같은 함수비 조건에서는 비배수 전단강도가 증가한다(Watts et al., 2003).

바이오폴리머는 간극수의 점도와 흙의 수분 보유력을 증가시키기 때문에 BPST의 액성한계는 증가한다(Chang et al., 2019b). Fig. 3에서 무처리 상태의 카올린 점토(kaolinite clay)의 액성한계는 70%이지만 바이오폴리머를 1% 처리한 경우 액성한계가 약 80%로 증가하였다. 또한 점토질 실트의 경우 바이오폴리머를 처리함에 따라 액성한계가 증가하는 경향을 보이고 있으며 바이오폴리머를 2% 처리한 경우 무처리 상태보다 6% 포인트 증가한 36%가 된다. 따라서 바이오폴리머는 점토질 흙의 통일분류법(Unified soil classification system; USCS)을 바꿀 수 있다. 하지만, 비표면적이 넓고 양이온 교환 능력이 뛰어난 몬트모릴로나이트 점토(montmorillonite clay)는 바이오폴리머 처리를 할 경우 액성한계가 감소한다(Chang et al., 2019b). Fig. 3에서 400%의 몬트모릴로나이트 점토의 액성한계는 바이오폴리머 1% 처리에서 370%, 2% 처리에서 350%로 감소하는 경향을 보였다.

3.1.2 투수계수

바이오폴리머 하이드로겔의 존재는 흙의 수분 보유 특성을 바꾸거나 간극을 매움으로써 흙의 투수계수에 영향을 미친다(Crous, 2017). Chang et al.(2016b)

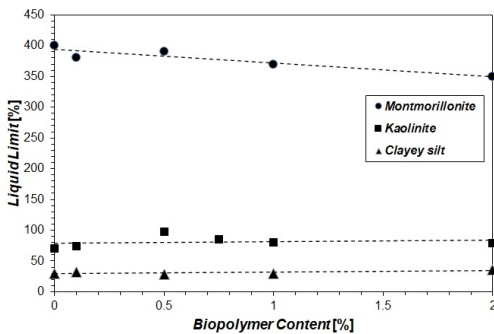


Fig. 3. Liquid Limit of Xanthan Gum-treated Soils with Variation in m_b/m_s and Soil Types

Source: Chang et al. (2019b)

에 의하면 건조된 바이오필름(biofilm)이나 수분이 있는 하이드로겔에 관계없이, BPST가 물에 노출되면 바이오폴리머는 친수성 흡착을 통해 팽창하고 유체의 흐름 경로를 감소시켜 흙의 투수계수가 감소한다. Fig. 4는 바이오폴리머 처리된 모래의 투수계수 감소 효과를 보여준다. 모래에 gellan gum을 1% 처리(2.6×10^{-10} m/s)한 경우 무처리 조건(2.1×10^{-6} m/s)보다 투수계수가 기하급수적으로 감소하고 gellan gum의 농도가 더 증가하면 투수계수가 8.2×10^{-11} m/s로 불투수층에 가깝게 수렴한다(Chang et al., 2016b).

3.1.3 일축압축강도(UCS)

일축압축강도(Unconfined compressive strength; UCS)는 점착력이 존재하는 흙 시료에 축하중을 가하여 흙의 비배수 전단강도를 간접적으로 결정할 수 있는 방법이다(Das and Sobhan, 2014). 바이오폴리머는 일반적으로 흙 입자들을 응집하거나 바이오폴리머와 흙 입자 사이의 정전기적 접착을 형성하여 흙의 UCS를 증가시킨다(Chang et al., 2015a).

Chang et al.(2015a)에 의하면 BPST의 UCS는 바이오폴리머 함량에 따라 증가한다. Xanthan gum을 처리한 BPST의 경우 xanthan gum의 농도가 높을수

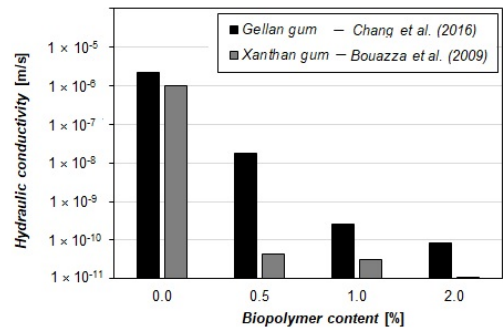


Fig. 4. Biopolymer Treatment Effect to the Hydraulic Conductivity of Biopolymer-sand Mixtures

Source: Chang et al. (2016b); Bouazza et al. (2009)

록, 하이드로겔의 탈수가 진행될수록 UCS가 증가한다. Fig. 5는 28일 실온 건조된 모래, 자연사, 황토의 UCS를 보여준다. 각 흙은 모래 30%, 자연사 30%, 황토 60%로 초기 함수비가 설정되었다. 이때 xanthan gum의 농도에 따라 흙의 UCS가 증가한다. 모래의 최적 xanthan gum 농도는 대략 1.5-2%이고 그때의 UCS 값은 약 0.9-1.2MPa이다. 게다가, Xanthan gum은 점토질 모래, 카올린 점토, 몬트모릴로나이트 점토와 같은 점성토에서 더 높은 강도 증진 효과를 보인다(Chang et al., 2015c). 이는 xanthan gum과 점

토 입자 사이의 이온 결합과 수소결합으로 형성된 바이오폴리머-점토 매트릭스(biopolymer-clay matrix) 때문이다(Chang and Cho, 2019c).

3.1.4 전단강도

전단강도는 지반이 구조적 파괴 없이 견딜 수 있는 응력을 말하며 지반공학에서 안전한 구조물 설계를 위해 매우 중요한 요소이다(Vanapalli et al., 1996). 최근 연구에 따르면, 다양한 BPST는 전단강도정수(점착력, 내부마찰각)를 개선하는 효과가 있는 것으로 보고된다(Chang et al., 2020). Table 2를 보면 바이오폴리머는 포화 정도에 상관없이 모래와 점토 모두의 겔보기 점착력을 증가시킨다. 모래의 경우 무처리 상태에서 점착력은 0이지만 gellan gum 2% 처리 후 포화상태와 건조상태 각각의 점착력이 103.5 kPa, 166.2kPa로 상승하였다. 하지만 마찰 거동에서는 바이오폴리머가 미미한 영향을 미치는 것으로 보인다. 포화상태에서는 내부마찰각이 바이오폴리머 처리 전과 같거나 그보다 작다(Table 2). 즉, 습윤상태의 바이오폴리머 하이드로겔은 입자 사이에서 마찰에 미치는 영향이 무시할만하다(Chang et al., 2020). 그러나 건조상태의 경우 바이오폴리머 처

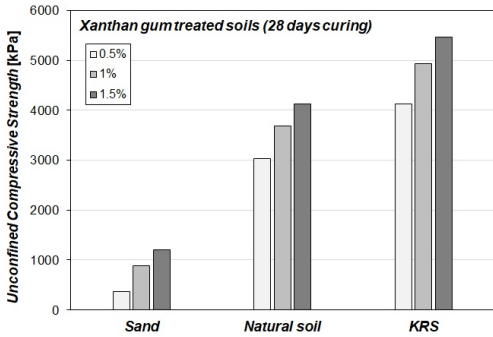


Fig. 5. Unconfined Compressive Strength of Xanthan Gum-treated Soils with Various Soil Types

Source: Chang et al. (2015c)

Table 2. Shear Strength Parameters (Cohesion and Friction Angle) of Biopolymer-treated Soils

BPST conditions				Cohesion [kPa]		Friction [°]	
Soil type	BP type	m_b/m_s^* [%]	W/C	Untreated	Treated	Untreated	Treated
Clay	Citosan	0.16	WET	10.0	30.3	21.8	22.3
Clay	Gellan	5	WET	18.5	81.8	18.7	29.3
Sand	Xanthan	1.5	WET	0	91.0	33.0	29.0
Sand	Agar	0.6	WET	0	111.0	32.3	25.6
Sand	Gellan	2	WET	0	103.5	27.9	29.5
Sand	Gellan	2	DRY	0	166.2	27.9	47.2
Sand	Casein	1	DRY	0.2	124.4	36.6	46.0
Sand	Sodium Casein	1	DRY	0.2	145.8	36.6	42.5
Sand	Xanthan	2	DRY	13	218.4	27.9	38.4

Note: * indicate biopolymer to soil ratio in mass

Source: Chang et al. (2020)

리 후 모래의 내부마찰각이 증가하였다. 예를 들어, gellan gum 2% 처리된 모래는 포화상태에서 내부 마찰각이 +1.6°(27.9°에서 29.5°) 증가했지만, 건조 상태에서는 내부마찰각이 +19.3° 증가한 47.2°가 됐다(Table 2). 이는 건조된 바이오필름이 응축되면서 모래 입자에 코팅 막을 형성하고 입자들을 결합하기 때문이다(Chang et al., 2016b).

4. BPST 거동의 주요 영향인자

4.1 사질토 전단강도의 영향인자

흙의 강도는 곧 전단강도라고 할 수 있다. 사질토의 전단거동은 주로 입자의 형상, 입도분포, 상대밀도, 함수비, 구속응력에 영향을 받는다. 그러나 같은 실험 조건에서는 입자의 형상과 구속응력이 일정하므로 고려하지 않는다. 따라서 사질토에서 입도분포, 상대밀도, 함수비가 전단강도를 결정하는 주요

영향인자임을 알 수 있다. 하지만 사질토에 바이오폴리머를 처리한 BPST의 경우 바이오폴리머의 종류, 농도와 같은 새로운 영향인자가 추가된다(Fig. 6). BPST의 강도 특성을 파악하기 위해서는 바이오폴리머의 종류나 농도가 사질토의 전단거동에 미치는 영향의 정도를 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 머신러닝 회귀분석을 이용하여 주요한 영향인자를 도출하고자 한다.

4.2 머신러닝(Machine Learning) 회귀분석 (Regression analysis)

회귀(regression)는 여러 개의 독립변수와 한 개의 종속변수 간의 상관관계를 모델링하는 기법이다. 선형 회귀식을 예로 들면 식 (1)과 같다.

$$Y = W_1 \times X_1 + W_2 \times X_2 + W_3 \times X_3 + \dots + W_n \times X_n \quad (1)$$

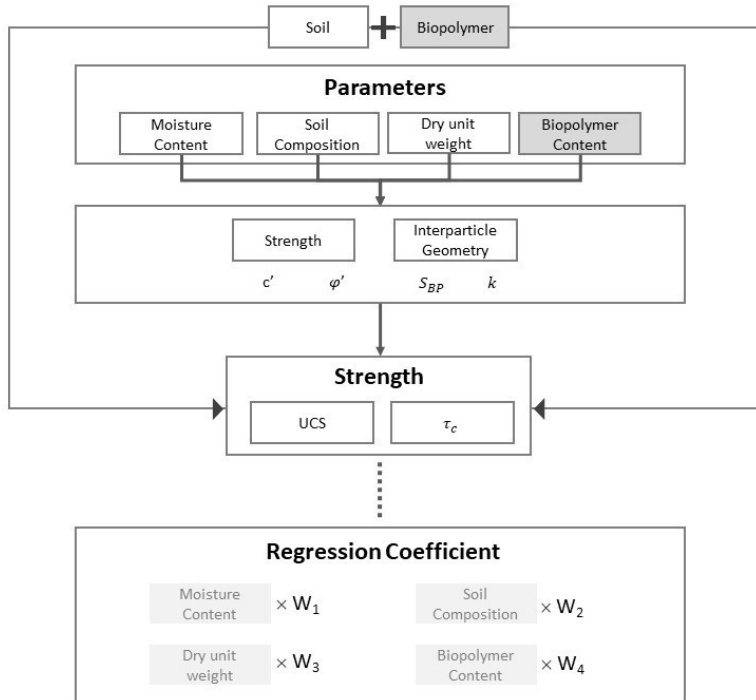


Fig. 6. Soil Strengthening Process by Biopolymer and Regression Analysis

여기서 Y 는 종속변수, X_i 는 독립변수, W_i 는 회귀 계수(regression coefficients)이다. 회귀계수는 각각의 독립변수 값에 영향을 미친다. 따라서 머신러닝 회귀 예측의 핵심은 주어진 독립변수와 종속변수의 데이터를 기반으로 학습하여 최적의 회귀계수를 찾는 것이다(권철민, 2020).

선형회귀의 대표적인 모델로 일반선형회귀(Linear Regression; LR), 릿지(Ridge), 라쏘(Lasso) 등이 있다. LR은 예측값과 실제 값의 비용 함수(Residual sum of squares; RSS)를 최소화해 OLS(Ordinary least squares)를 추정하는 회귀 기법이다. 이때 LR은 규제(regularization)를 적용하지 않는 방식인데, 이때 규제란 과대 적합을 방지하기 위해 비용 함수에 알파(alpha)를 적용하여 회귀계수가 기하급수적으로 커지는 것을 제어한다. 규제는 크게 L2 방식과 L1 방식으로 구분된다. L2 규제는 상대적으로 큰 회귀계수 값의 영향도를 감소시키기 위해서 회귀계수 제곱 값에 대해 패널티를 부여하는 방식이다. L1 규제는 회귀계수 절댓값에 대해 패널티를 부여한다. 이때 영향력이 작은 인자(feature)의 회귀계수 값을 0으로 만들어 회귀 예측시 영향력 없는 피처가 선택되지 않도록 한다. L2 규제를 적용한 회귀가 Ridge 회귀이고, L1 규제를 적용

한 회귀가 Lasso 회귀이다. 이외에 L2, L1 규제를 결합한 엘라스틱넷(ElasticNet) 등이 있다(권철민, 2020).

본 연구에서는 LR, Ridge, Lasso를 이용하여 BPST 거동의 주요 영향인자를 산출하였다.

4.3 적용 데이터

회귀분석을 위해 사용한 데이터는 2013년부터 2019년에 출판된 BPST 관련 논문의 실험 데이터이다. 흙의 전단강도를 결정하는 방법 중 하나인 일축 압축시험의 데이터 값을 이용하였다. Gellan gum으로 처리된 모래, 점토, 혼합토의 일축압축강도를 분석하였고, 데이터의 수는 총 81개이다.

일축압축강도(UCS)에 영향을 미치는 인자(feature)로 바이오폴리머의 농도, 흙의 조성, 함수비, 건조단위중량을 고려하였다. 특히 바이오폴리머의 농도는 전체 흙의 질량 대비 바이오폴리머 질량(m_b/m_s)과 점토의 질량 대비 바이오폴리머의 질량(m_b/m_c) 두 가지를 적용하였다.

4.4 BPST의 강도를 결정하는 주요 영향인자

Fig. 7에서 모든 모델의 회귀계수를 시각화하였다. LR에서 회귀계수가 가장 큰 인자(feature)는 건조단

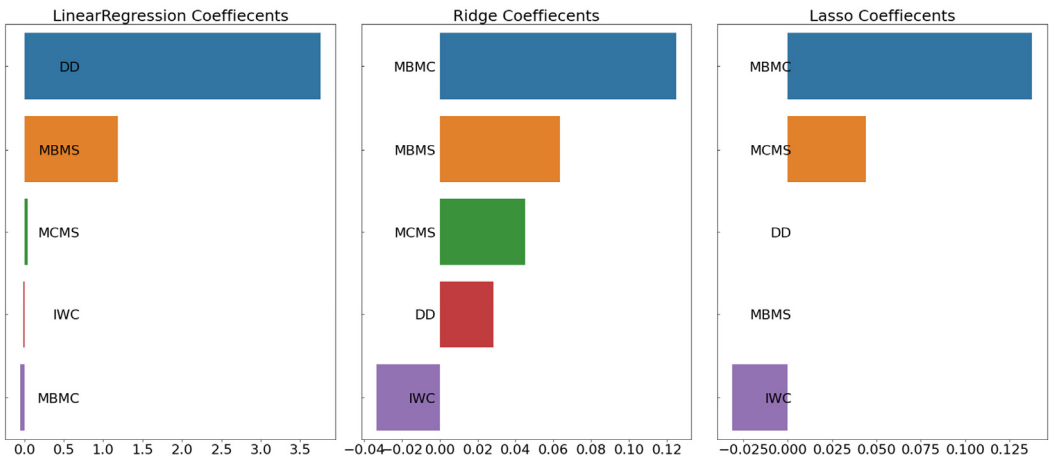


Fig. 7. Visualizing Regression Coefficients for LR, Ridge, Lasso Regression Model in Python

Note: MBMC= m_b/m_c ; MBMS= m_b/m_s ; MCMS= m_c/m_s ; DD=dry density; IWC=initial water content

위중량(dry density; DD)이다. Ridge와 Lasso는 동일하게 m_b/m_c (MBMC)의 회귀계수 값이 가장 크다. 두 번째로 큰 회귀계수 값을 보인 인자는 LR과 Ridge에서 동일하게 m_b/m_s (MBMS)이고, Lasso에서는 m_c/m_s (MCMS)이다. 다시 말해, 전체 흙의 질량 대비 바이오폴리머의 질량(m_b/m_s)이 Ridge와 Lasso에서 가장 주요한 인자로 평가됐고, LR에서는 두 번째로 중요한 인자로 평가됐다.

각 회귀의 RMSE(Root mean squared error)는 LR이 0.781, Ridge가 0.776, Lasso가 0.777로 Ridge의 오차값이 가장 작다(Table 3). 즉, Ridge의 회귀 예측이 가장 잘 수행됐다고 평가할 수 있으며 그때의 최대 영향인자가 m_b/m_c 이다. Lasso는 RMSE가 0.777로 두 번째로 작은 값을 가졌고 그 값이 Ridge와 큰 차이가 없다. LR의 경우 건조단위중량(DD)이 가장 중요한 인자로 평가되었으나 LR은 규제를 적용하지 않은 모델로서 특정 인자의 과대적합이 발생할 가능성이 있다. DD의 회귀계수 값이 다른 인자들의 회귀계수 값보다 월등히 크고 Ridge와 Lasso에서 DD는 저평가되었으므로 LR의 회귀 예측은 과대적합 되었다고 볼 수 있다. 따라서 LR 보다는 Ridge와 Lasso의 회귀의 평가 결과를 신뢰할만하다고 판단한다.

BPST의 UCS를 머신러닝 회귀분석 한 결과, 점토 대비 바이오폴리머의 농도(m_b/m_c)가 UCS를 결정하는 가장 중요한 인자라고 보여진다. 또한 두 번째로 높게 평가되었던 m_b/m_s 와 함께 고려하면 BPST의 강도특성을 결정하는 가장 중요한 인자는 바이오폴

리머의 농도라는 것을 알 수 있다. 점토의 함량비 m_c/m_s 는 Lasso에서 2번째, Ridge에서 3번째 중요도로 평가되었는데, 점토 대비 바이오폴리머의 농도(m_b/m_c)가 가장 중요한 인자이고 또한 점토의 함량비(m_c/m_s) 역시 무시할 수 없는 인자이므로 이는 결국 BPST에서 점토의 존재 여부가 BPST의 강도와 거동을 결정하는데 주요한 역할을 하는 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구는 바이오폴리머를 흙에 적용하는 BPST의 특성과 효과에 대해 살펴보고, BPST의 거동 특성을 지배하는 인자를 머신러닝 회귀분석을 이용하여 도출하였다.

- (1) 산업화 이후 지구온난화의 가속화로 지반재해가 빈번히 발생하고 있다. 지반재해로 인한 피해를 줄이기 위해 지반공학 역시 탄소 발자국을 줄이는 지속 가능한 대책 마련이 시급하다.
- (2) 기존의 시멘트 위주의 지반보강 방법을 대체하는 생물학적 지반보강 방법이 주목받고 있다. 특히 바이오폴리머는 친환경적이고 흙의 강도 증진 효과가 입증된 바 있다.
- (3) 바이오폴리머는 점착력 없는 모래질 흙의 입자들을 응집시켜 점착력을 높이고 흙의 강도를 증진시킨다.
- (4) 바이오폴리머는 모래질 흙 보다 점토질 흙에서 더 큰 강도증진 효과를 보이며 이는 바이오폴리머가 점토 입자와 이온 결합 및 수소결합을 형성하기 때문이다.
- (5) BPST의 주요 영향인자를 머신러닝 회귀분석을 통해 평가한 결과 m_b/m_s 가 가장 중요한 인자로 도출되었다. 게다가 m_c/m_s 역시 중요도가 높은 것으로 보아 바이오폴리머와 점토의 결합 정도가 BPST 강도 특성의 주요한 요인으로 사료된다.

Table 3. RMSE for Each Regression

Regression type	RMSE
Linear Regression	0.781
Ridge	0.776
Lasso	0.777

Note: RMSE is Root Mean Squared Error

참고문헌

1. 권철민(2020), 「파이썬 머신러닝 완벽 가이드」, 파주: 위키북스.
2. Agassi, M. and M. Ben-Hur (1992), "Stabilizing steep slopes with soil conditioners and plants", *Soil Technology*, 5: 249~256.
3. Bouazza, A., W. Gates and P. Ranjith (2009), "Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand", *Géotechnique*, 59: 71~72.
4. Bouwer, L. M. (2011), "Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change?", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 92: 39~46.
5. Cao, S. (2008), "Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem", *Environ Sci Technol*, 42: 1826~1831.
6. Chang, I., A. K. Prasadhi, J. Im and G. C. Cho (2015a), "Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers", *Constr Build Mater*, 77: 430~438.
7. Chang, I., A. K. Prasadhi, J. Im, H. D. Shin and G. C. Cho (2015b), "Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes", *Geoderma*, 253~254: 39~47.
8. Chang, I., J. Im, A. K. Prasadhi and G. C. Cho (2015c), "Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening", *Constr Build Mater*, 74: 65~72.
9. Chang, I., J. Im, G. C. Cho (2016a), "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering", *Sustainability*, 8: 251.
10. Chang, I., J. Im and G. C. Cho (2016b), "Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand", *Can Geotech J*, 53: 1658~1670.
11. Chang, I., J. Im, S. W. Lee and G. C. Cho (2017), "Strength durability of gellan gum biopolymer-treated Korean sand with cyclic wetting and drying", *Constr Build Mater*, 143: 210~221.
12. Chang, I., M. H. Lee and G. C. Cho (2019a), "Global CO₂ emission-related geotechnical engineering hazards and the mission for sustainable geotechnical engineering", *Energies*, 12(13): 2567.
13. Chang, I., Y. M. Kwon, J. Im and G. C. Cho (2019b), "Soil consistency and interparticle characteristics of xanthan gum biopolymer-containing soils with pore-fluid variation", *Can Geotech J*, 56: 1206~1213.
14. Chang, I. and G. C. Cho (2019c), "Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay", *Acta Geotech*, 14: 361~375.
15. Chang, I., M. Lee, A. T. P. Tran, S. Lee, Y. M. Kwon, J. Im and G. C. Cho (2020), "Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices", *Transportation Geotechnics, Elsevier*, 24: 100385.
16. Choi, S. G., I. Chang, M. Lee, J. H. Lee, J. T. Han and T. H. Kwon (2020), "Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers", *Construction and Building Materials*, 246: 118415.
17. Crous, J. W. (2017), "Use of hydrogels in the planting of industrial wood plantations", *Southern For J For Sci*, 79: 197~213.
18. Das, B. M. and K. Sobhan (2014), *Principles of Geotechnical Engineering*, Australia: Cengage Learning.
19. DeJong, J. T., B. M. Mortensen, B. C. Martinez and D. C. Nelson (2010), "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, 36: 197~210.
20. IPCC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
21. Kavazanjian, E., E. Iglesias and I. Karatas (2009), "Biopolymer soil stabilization for wind erosion control", *In the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 881~884.
22. Kim, M., I. Song, M. Kim, S. Kim, Y. Kim, Y. Choi, M. Seo (2015), "Effect of polyacrylamide application on water and nutrient movements in soils", *J Agric Chem Environ*, 4: 76.
23. Larson, S., J. Ballard, C. Griggs, J. K. Newman and C. Nestler (2010), "An innovative non-ptroleum Rhizobium Tropici biopolymer salt for soil stabilization", *In ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 5: 1279~1284.
24. Lee, M., J. Im, I. Chang and G. C. Cho (2021), "Evaluation of injection capabilities of a biopolymer-

- based grout material”, *Geomechanics and Engineering*, 25(1): 31~40.
25. Lee, S., M. K. Chung, H. M. Park, K. I. Song and I. Chang (2019), “Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11): 060190120.
 26. Orts, W., R. Sojka and G. Glenn (2000), “Biopolymer additives to reduce erosion-induced soil losses during irrigation”, *Ind Crops Prod*, 11: 19~29.
 27. Peralta, J., M. A. Raouf, S. Tang and R. C. Williams (2012), “Bio-Renewable Asphalt Modifiers and Asphalt Substitutes”, in *Sustainable Bioenergy and Bioproducts*, (ed) Gopalakrishnan, K., 89-115, London: Springer London.
 28. Sinha, R. K. (2004), *Modern Plant Physiology*, U.K.: Alpha Science International.
 29. Sonebi, M. (2006), “Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash”, *Cem Concr Res*, 36: 1609~1618.
 30. Stabnikov, V., V. Ivanov and J. Chu (2015), “Construction Biotechnology: a new area of biotechnological research and applications”, *World J Microbiol Biotechnol*, 31: 1303~1314.
 31. Starkey, T. E., S. A. Enebak, D. B. South and R. E. Cross (2012), “Particle size and composition of polymer root gels affect loblolly pine seedling survival”, *Native Plants J*, 13: 19~26.
 32. Tongway, D. J., A. D. Sparrow and M. H. Friedel (2003), “Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 1: soil and land resources”, *J Arid Environ*, 55: 301~326.
 33. Tran, A. T. P., I. Chang and G. C. Cho (2019), “Soil water retention and vegetation growth improvement using microbial biopolymers for anti-desertification practices”, *Geomechanics and Engineering*, 17(5): 475~483.
 34. Vanapalli, S. K., D. G. Fredlund, D. E. Pufahl and A. W. Clifton (1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Can Geotech J*, 33: 379~392.
 35. Venkatasubramanian, C. and G. Dhinakaran (2011), “Effect of bio-enzymatic soil stabilisation on unconfined compressive strength and California bearing ratio”, *J Eng Appl Sci*, 6: 295~298.
 36. Watts, C. W., T. J. Tolhurst, K. S. Black and A. P. Whitmore (2003), “In situ measurements of erosion shear stress and geotechnical shear strength of the intertidal sediments of the experimental managed realignment scheme at Tollesbury, Essex, UK”, *Estuar Coast Shelf Sci*, 58: 611~620.
 37. United States Geological Survey (USGS) (2019), “Cement statistics and information”, Accessed June 7, 2019. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>.

요 약

최근 지구 온난화로 인한 이상 기후로 인해 과거보다 더 많은 지반공학 재해들이 발생하고 있으며, 재해들의 규모도 더욱 증대되고 있다. 최근 토목 및 건설분야에 소개된 바이오폴리머 기반 흙 처리(BPST; Biopolymer-based soil treatment) 기술은 효율적으로 흙의 강도를 증진시키면서 탄소배출이 거의 없는 친환경 지반보강법으로 알려져 있다. 특히, 아가검, 젤란검, 잔탄검과 같은 열적젤화 특성을 지닌 바이오폴리머들의 강도 증진 효과가 매우 우수함이 여러 연구를 통해 밝혀지고 있다. 하지만 바이오폴리머 함량 외에는 바이오폴리머 기반 흙 처리에서 흙의 강도 증진을 제어하는 주요 영향인자 규명에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기존 발표된 열적젤화 바이오폴리머 처리 흙의 불구속일축압축강도(UCS; Unconfined compressive strength) 자료에 대한 기계학습 기반 선형 회귀 분석을 통해 젤란검 바이오폴리머로 처리된 흙의 강도 발현을 결정하는 주요 인자들을 분석하였다. 해석 결과, 바이오폴리머 함량과 더불어 흙 속 점토 함량이 강도 발현에 가장 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

주제어 : 바이오폴리머, 바이오폴리머-기반 흙 처리, 기계학습, 선형회귀, 강도 증진