

DOI 10.58880/DKU.2024.03.013

МРНТИ: 34.35.01

ФЕРМЕНТТІК ИНДУКЦИЯЛАНҒАН КАЛЬЦИЙ КАРБОНАТЫНЫҢ ТҮНБАСЫН ТОЗҒАН ТОПЫРАҚТЫ НЫҒАЙТУ ҮШІН ҚОЛДАНУ

М.Е. Даулеткүл¹, Б.Т. Жанатаев¹, З.Б. Тұңғышбаева¹
¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
Алматы., Қазақстан
(e-mail: Dauletkul_meirzhan@mail.ru)

Аннотация

Бұл мақалада EICP (Enzymatic Induced Calcite precipitation) - ерітіндісінің тозған топырақтың құрылымын нығайту әсерінің тиімділігін анықтау үшін зерттеу жұмыстары жүргізілді. Бұл биогеотехникалық әдіс-несепнәрдің гидролизденіп, уреаз ферментімен катализдену нәтижесінде кальций карбонаты тұнбасының (CaCO_3) түзілуі арқылы жасалынады. Ерітіндінің құрамы 0.65M несепнәрден, кальций хлоридінен 0,86M (CaCl_2) және 4г/л уреаз ферментінен тұрады. Осы аталған ерітіндімен өңдеу нәтижесінде құмның бөлімдерін бір-бірімен байланыстыратын, кристалл түзеді, яғни карбонаттың тұндырылуы барысында, топырақтың өткізгіштігін төмендеті отырып, оның беріктік қасиетін қамтамасыз етеді. Бұл зерттеу жұмысына уреаз ферментін ауыстыратын табиғи шикізат өнімі ретінде фермент соя бұршағынан бөлініп алынды. Топырақты (Ақтау құмы) EICP ерітіндісімен өңдеу арқылы, олардың құрамындағы ферменттердің белсенділігін арттырып, карбонаттың тұндырылу дәрежесінің жоғары болуына алып келеді. Сонымен қатар, топырақты ферменттік индукцияланған кальций карбонатының ерітіндісімен өңдеу барысында түзілген ағын сулардан несепнәр мен кальций хлоридін түзіледі, бірақ уреазалық ферменттерді түзбейтіндігі анықталды. Фермент топырақ құрамындағы несепнәр мен кальций карбонатымен әрекеттесіп, карбонаттың тұндырылуын түзіп, топырақ бөлімдерінің бір-бірімен байланыстыру арқылы кальций карбонатының кристаллын түзеді. Түзілген кальций карбонатының кристаллы топырақ бөлімдерін нығайтып, оны борпылдақ күйінен қатты тығыздалған күйге айналдырады.

Нығайтылған құм бағанының үлгілері шектеусіз қысу күшіне тексеріліп, сканерлеуші электронды микроскоппен түсірілді.

Түйін сөздер: Биогеотехника, кальций хлориді, нығайтылу, несепнәр, EICP.

Кіріспе

Қазіргі кезеңде жаһандық проблемалардың бірі жердің тозуы және шөлейттенуі болып табылады. Желдің әсерінен құмның көшіп, топырақтың шөлейттенуі салдарынан ауылшаруашылық жерлері шөлге айналуға [1]. Жел эрозиясы - топырақтың тозуының негізгі факторларының бірі, сонымен қатар құрғақ, жалпы алғанда экожүйелердің функционалдығының төмендеуі нәтижесінде аумақтардың биоалуан түрлілігіне теріс әсер көрсетеді [2]. Соңғы жиырма жылдың аралығында «Ферменттік индукцияланған кальций карбонатының тұнбасы (EICP)» әдісі ғылымға таныла бастады [3]. Алғаш рет ғылымға Брайан Кнорр енгізілген, бірақ, осы әдісті топырақтың инженерлік қасиеттеріне қолдануды технологиясын алғаш рет Немати мен Вур Доу зерттеді. Олар топырақтың борпылдақтық құрылымының өткізгіштігін төмендеуіне осы әдістің тиімділігін зерттеп, және екі EICP өңдеу циклі топырақтың өткізгіштіктігінің 98% төмендеуіне, CaCO_3 тұндырмасымен топырақтың саңылауларын бітеу арқылы қол жеткізуге болатындығын көрсетті [4]. Бұл әдіс химиялық әдістермен салыстырғанда, бірқатар артықшылықтарға ие - улы емес,

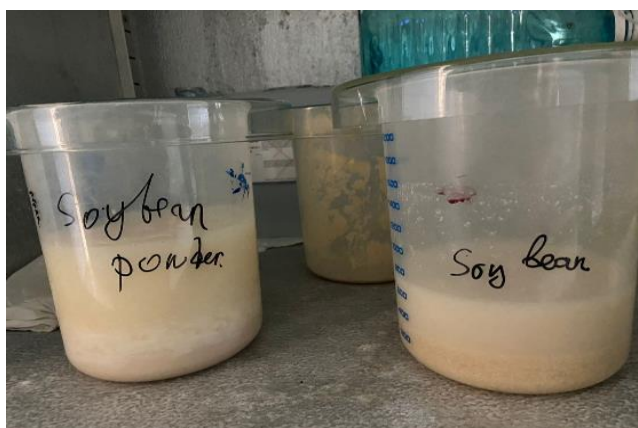
қоршаған ортаға зиянсыз, қолдануға ыңғайлы[5]. Бұл технологияны қолдану шөлді аймақтарда жиі болатын шанды дауылдардың пайда болуын азайтады[6]. Осы технологиялар бойынша құмды нығайту үшін, уреаз ферменті мен кальцит және несепнәр қажет. Құмдарға несепнәрді ыдырататын уреаз ферментін синтездейтін бактериялар мен уреаз ферменттері қосылады[8]. Егерде жер бетінде деградациялану, мысалы несепнәрдің ыдырауы сияқты процесстер болмаса жер беті азоттық қалдықтарына толып кетер еді[9]. Бірақ, табиғатта (суда, табиғатта және т.б) несепнәрдің гидролизденуі барысында ыдырауын катализдейтін заттар бар[10]. Бұл катализаторлар – уреаз ферменттері болып табылады. Уреаз ферменті несепнәрді аммиак пен көмірқышқыл газына дейін ыдыратады[11].

Ясухара және т.б ғалымдар, ЕІСР ерітіндісімен өңделген Тойура құмының ($d_{50} = 0,20$ мм) механикалық қасиеттерін зерттеу үшін шектеусіз қысу күшіне тексерді. Олар CaCO_3 (см/куб) тұндырмасының, шектеусіз қысу күшінің ең жоғарғы шамасы 1600 кПа өңдеудің 4-8 циклынан кейін қол жеткізді. CaCO_3 тұндырмасының ЕІСР ерітіндісімен өңделу барысында, біркелкелкілігін Neupane және т.б. қасиетін зерттеп және CaCO_3 тұндырмасының тең дәрежеде тұндырылады деп көрсетеді.

ЕІСР ерітіндісімен өңдеудің тиімділігін арттыру үшін араластырылу, тығыздалу, перколяциялық әдістері қолданылады. Сондай-ақ, кальциттің ұсақ бөлшектірінінің ерітіндімен қосылу нәтижесінде карбонаттың тұндырылуына көз жеткіземіз және нығайтылған құм бағанының үлгілерді деионизацияланған сумен шайғанда, пайда болған өзгерістер зерттеледі. Құм бағандарына жасалған лабораториялық зерттеулерге соя бұршағынан алынған уреазалық ферменттер арқылы жасалынып, ал негізгі объектісі үшін Ақтау құмы қолданылды.

Зерттеу әдістері

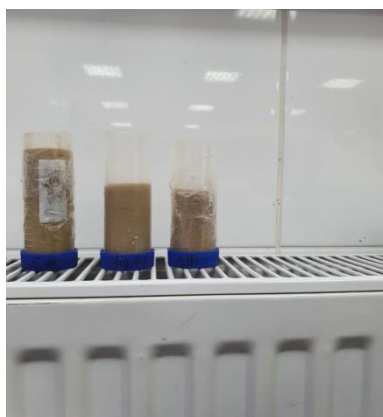
Соя бұршағының ұнтағынан уреаз ферментін бөліп алу. Соя ұнтағының қажетті концентрациясын дистильденген сумен араластыру арқылы уреаз алынды. Кептірілген соя бұршақтарының дәндерін дезинтегратормен ұнтақталып, өткізілді. 50 г соя ұнтағын 500 литр дистильденген сумен 30 минут бойы араластырды. Ерітінді магнитті араластырғышпен 6 минут бойы суспензияның біртекті ерітіндісін алғанға дейін араластырылды. Тоңазытқышта 4°C температурада 24 сағат сақтағаннан кейін, соя ұнтағының ерітіндісі 15 минут ішінде 3000 айн/мин центрифугадан өткізіліп, жинақталған уреаз ерітіндісі (1- сурет) зерттеу жұмыстарына қолданылды.



Сурет 1 - Соя бұршағының ұнтағынан бөлініп алынған уреаз ферменті
Топырақ бағанының ЕІСР ерітіндісімен өңделуі.

Топырақты өңдеу үшін, өңдеуші ерітінді құрамы 1М несепнәр, 0,76 М кальций хлориді, және 3 г/л фермент құм бағансына қосылды. Бұл концентрациялар сынауықта жасалған

тәжірибиелер көрсеткендей, жоғары тұндырылу массасын түзуге қабілеттілігін көрсетті. Зерттеу жұмыстарына түссіз, мөлдір жұқа қабырғалы акрильді құм бағанасы қолданылады



Өңделген үлгілерді алу үшін цилиндр тәрізді бағаналардың ішкі бөлімі полипропиленмен бекітілді. Електен өткізілген Ақтаудың құмы қолданылды. Құмның бастапқы көлемінен азайғаны байқалды және құмда бос кеңістіктер пайда болды. Осы бөліктерді нығайту үшін торырақтың үстінгі бөлігінен механикалық соққылар жасалынып, тығыздалды. Құм бағаналары ерітіндімен өңделініп, араластырылып нығыздалып, әр цикл сайын өңделініп отырды. Дайындалған биоцементтік үлгілер тұндыру арқылы өңделіп, ал цилиндр тәрізді бағаналарда орналасқан құрғақ құм бөліктері тығыздық мөлшері 47%-дық көрсеткіште болды. Содан кейін құм бағанының жоғарғы бөліміне ЕІСР өңдеу ерітіндісі қосылды, төменгі бөлімі арнайы тығындар арқылы жабылды. Топырақты нығайту үшін, цементтеуші ерітінді бір көлемдік қатынасы қосылып бірінші циклында перколяция арқылы жасалынды.

Құм бағандары дайындау араластырылу және нығыздалу арқылы жасалынды, тығыздық көрсеткіші 47%-дық құрғақ құмдарға 80 мл ЕІСР ерітіндісі қосылды. құмның тығыздық көрсеткіші 47%-дық шамаға келетін ерітіндіні құм бағанасындағы бөліктеріне сәйкес қосылды. Дайын болған үш үлгілер қосымша өңдеуден өткізілді (2,4 өңдеу циклдарында). Әр өңдеу циклінен кейін барлық үлгілер, 7 күнге бөлме температурасында кептірілді. Құм бағанын кептіру барысында, булану процесі кезінде ерітіндінің концентрациясының азаюынан сақтау үшін, бетін нейлон материалынан жасалған эластикалық лентамен жабамыз. Үлгілер кептірілген соң құм бағанының астыңғы бөлігіне шприцті орналастырамыз. Содан кейін үлгілерге бағанның жоғарғы жағынан бір көлемдік мөлшерде (яғни ~ 70 мл) деионизацияланған су қосылып, ол өңдеу циклінен кейін қосылып, оның құм бағанының төменгі бөлігіне ағып кетуіне мүмкіндік берді. Әр деионизацияланған су қосылғаннан соң, құм бағананың астыңғы бөлігін жабық күйде өңдеуші ерітінді қосылды.

Көлемі шамамен, 2, 3 және 4 өңдеу циклдарында 60 мл, 70 мл және 80 мл. қажетті ерітінді мөлшері құм бағандарының жоғарғы бөлігінің көлеміне сәйкес қосылды. Осы қоспалардың концентрациясы бірдей болды және олар бір сынауықта жасалынды. ЕІСР - ерітіндісінің топырақ бағанының карбонаттың тұндырылу және тығыздалуы сынды механизмдері шекипусіз қысу күшімен тексерілді. Бұл топырақ бағанында, кеңістіктің пайда болуы тұндырылудың дұрыс жүрмеуінен яғни, әрбір цикл сайын ерітінділермен өңдеу кезінде топырақтың бөліктерін дұрыс байланыс жасауын анықтауда қолданылады.

Нәтижелер және оларды талдау.

Тұндырылу массасы артуының әсерінен нығайтылған құмдарда саңылаудың көлемінің азаюынан және әр өңдеуден кейін үлгіде қалған ерітіндінің болуына байланысты бірінші өңдеу циклімен салыстырғанда, ерітінді аз мөлшерде қосылды. Соңғы өңдеу циклінен кейін

үлгілер 60 мл деионизацияланған су қосылып, тұрақты массасы қалыптасқанша, 40°C температурада пеште кептірілді. Кептірілген үлгілерді зерттелді. Оларды шектеусіз қысу күшіне беріктігі тексеру үшін құм бағанының үстінгі және астыңғы бөлігін арнайы темір пластикалық тегістеуші құралмен тегістелді. Шектеусіз қысу күшіне сынақтар 1,28 мм/мин деформация жылдамдығымен жүргізілді. Шектеусіз қысу күшіне сынақтар аяқталғаннан кейін, үлгілерге тұндырылған, кальций карбонатының массасы қышқылдық ашу жолымен анықталды. Бұл әдістер негізінде нығайтылған құм үлгілері 4 М тұз қышқылы (HCl) қайнауы тоқтағанша қосылды [14]. Қышқылды ашытуға дейін және одан кейін үлгінің массасының азаюы, топырақтағы карбонаттың тұндырылу массасына тең болды.

Кальциттің құм бағанына тұндырылуының кристаллизациясының түзу әсері:

Кальций карбонаты аморфты (яғни кристалды емес фаза) және бес түрлі кристалды фазада (кальцит, арагонит, ватерит, моногидрокальцит және икаит полиморфты, тұрақты пішінінің төмендеуімен) көрінуі мүмкін. Ромбоэдрикалық кальцит термодинамикалық тұрақтылығына байланысты геотехникада қолдану үшін, ең қажетті полиморф болып табылады. Біртекті субстракт түзетін тұндыратын ерітіндіні қосу арқылы кальцит кристалдары пайда болып, шамадан тыс құм бағанына сіңірілуінен тежейді. Сондықтан тұндырылу минерализациясының әсерін зерттеу үшін жуық шамамен мөлшері ≤ 30 мкм болатын кальциттің түйіршіктерін сынауыққа салынды. Карбонаттың тұндырылуының құрылымы мен морфологиясын көрінісі үшін сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) қолданылды.

Құм бағанының нығайтылу дәрежесінің тиімділігінің артуына 65% және 91%-дық араластырылу және нығайтылу арқылы бір циклдық өңдеумен жасалуы да әсер етеді. Карбонат мөлшері, тұндырылу коэффициенті шектеусіз қысу күшіне беріктігінің көресткіші және құм бағанының салыстырмалы 47%-дық тығыздығы (1- кесте) берілген.

Кесте 1 - Салыстырмалы тығыздығы 47% топырақ бағандарын ерітіндімен өңдеу нәтижелері

Өңдеу Циклдары	Араластыру және перколяция, арқылы бірінші циклден кейін алынған тұндырылу көрсеткіштері			Тұндырылу шамалары		
	Цикл #	CaCO ₃ (%)	Тұндырылу жиілігі(%)	q(кПа)	CaCO ₃ (%)	Тұндырылу шамасы (%)
1	1.2	80%	NA	1.22	85%	100
2	2.0	83%	NA	2.19	94%	295
3	2.7	91%	NA	3.07	97%	434
4	3.6	93%	NA	3.68	73%	1270

Осы аталған әдістер негізінде карбонаттар тұндырылу массасы әрбір өңдеу циклының санына байланысты, артып отырды.

Араластыру және перколяция (тұндырылу) арқылы жасалған бастапқы салыстырмалы тығыздығы шамамен 47% болатын үлгілерде акрилді құм бағанынан үлгілерді цилиндрлерінен экструдтау кезінде зақымдалмайтындай цементтенуі жеткіліксіз болды, бұл тұндырылу арқылы өңделген бастапқы салыстырмалы тығыздығы 47% үлгілер акрилді құм бағанынан алынған кезде өзгеріссіз қалды және шектеусіз қысу күшіне тексерілді 3-суретте



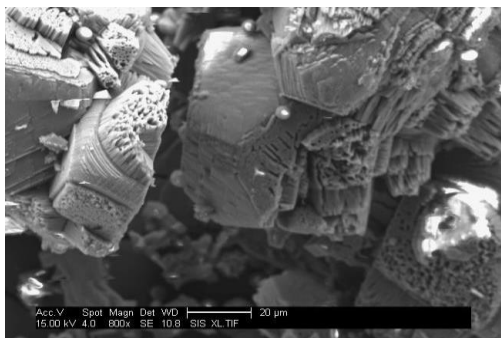
берілген.

Сурет 3 - Араластыру және тығыздалу (сол жақта) және перколяция (тұндырылу) әдістерімен дайындалған ЕІСР ерітіндісімен өңделген үлгілер (оң жақта).

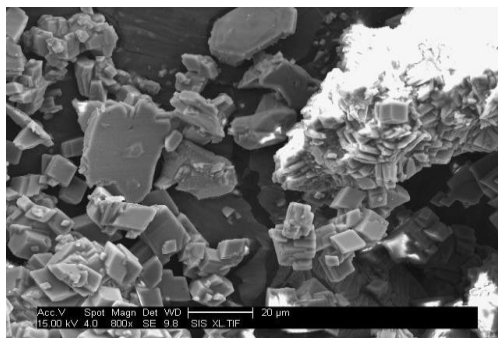
Кальциттің құм бағанына тұндырылуының кристаллизациясының түзу әсері:

Кальций карбонаты аморфты (яғни кристалды емес фаза) және бес түрлі кристалды фазада (кальцит, арагонит, ватерит, моногидрокальцит және икаит полиморфты, тұрақты пішінінің төмендеуімен) көрінуі мүмкін. Ромбоэдрикалық кальцит термодинамикалық тұрақтылығына байланысты геотехникада қолдану үшін, ең қажетті полиморф болып табылады. Біртекті субстракт түзетін тұндыратын ерітіндіні қосу арқылы кальцит кристалдары пайда болып, шамадан тыс құм бағанына сіңірілуінен тежейді. Сондықтан тұндырылу минерализациясының әсерін зерттеу үшін жуық шамамен мөлшері ≤ 30 мкм болатын кальциттің түйіршіктерін сынауыққа салынды. Карбонаттың тұндыруының құрылымы мен морфологиясын көрінісі үшін сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) қолданылды.

Сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) арқылы түсірілген ерітіндімен өңделмеген, деформацияланған кальций карбонатының тұндырылуы берілген (Сурет.4а). Ал ерітінді арқылы өңделген агломерленген ромбоэдрлік кальциттің тұндырылуының кристалдары бір-бірімен тығыз байланысып, пішіні тұрақтылығы көрсетілген (Сурет.4б).



Сурет 4а.Ерітіндімен өңделмеген, деформацияланған кальций



Сурет 4б.Ерітіндімен өңделген кальций карбонатының тұндырылуының

карбонатының тұндырылуының
морфологиясы

морфологиясы.

Бұл-ЕІСР ерітіндісімен өңдеу нәтижесінде ромбоэдрикалық кальциттің тұндырылуы, кезінде құрамында кальцит бар топырақта ықтимал екенін көрсетеді, дегенмен магний иондары мен органикалық қосылыстар сияқты ингибиторлық заттардың болуы кальцикристалдарының түзілуін тежеу мүмкін. Сонымен қатар, ерітіндімен өңделген кальцит кристалдарының мөлшері ерітіндімен өңделмеген кальцит кристалдарына ұсақ болды.

Қорытынды

Кальций хлориді, несепнәр және уреаз ферментінің әртүрлі концентрацияларында тұндырылуы мен тұндырылу массаларының қатынасын жүйелі бағалау жүргізілді. Құрамында 0,65 М несепнәр, 0,86М СаСІ және 4 г/л уреаз (уреазалық ортаға белсенділігі 3600 бірлік/г) ферментінен құралған ЕІСР ерітіндісі ферменттік әдісі ретінде қолдануыяғни жоғары тұндыру массасы үшін де, жоғары тұндыруға да тиімділігіменде анықталды. ЕІСР ерітіндісінде кальцит түйіршіктерінің болуы тұндырылу морфологиясын жақсарта алатыны дәлелденді. Араластыру және перколяция арқылы жасалған, бастапқы салыстырмалы тығыздығы 47% болатын Ақтау құмының бағандарының ЕІСР ерітіндісімен өңдеу үшін матрицадан шығарылғаннан кейін бағанның тұтастығын сақтау үшін құм бөлшектерінің арасындағы берік байланыс орнап, кристалл түзетін цементтенуі жүрмейтіндігіне әкелді. Бастапқы салыстырмалы тығыздығы 45% болатын тұндырылу арқылы жасалған құм бағанының, оның барлық бөлігінде берік байланыстардың нәтижесінен акрильді құм бағанынан алынған үлгілер деформацияға ұшырамады. Шектеусіз қысу күшіне тексеру барысында, карбонаттың шекті мөлшерінің болатындығы көрсетіліп, және топырақты ЕІСР ерітіндісімен өңдеу арқылы оның беріктігі күрт артады яғни, микробиологиялық индукцияланған кальций карбонаты тұнбасы ағыл. Microbial Induced Carbon Precipitation МІСР ерітіндісі арқылы өңделген топыраққа арналған басқада зерттеулер нәтижесімен салыстыра алғанда[12]. Дегенмен, ЕІСР арқылы өңдеген топырақтың беріктігіне тек тұндырылу механизмі ғана емес, сонымен қатар топырақты нығайтудың әдістемесіне немесе биоцементтік үлгілерді дайындау технологиясына және құм бөліктерінің дұрыс байланыс орнауыда байланысты[13]. ЕІСР арқылы өңдеген топырақтың деионизацияланған сумен жуылуы нәтижесінде, топырақтың арасындағы берік байланысты ажырататындығы дәлелденді. Сканерлеуші электронды микроскоппен көрсетілгендей, үлгілерде беріктік қасиетінің жойылуы, нығайтылған топырақтағы органикалық заттардың шайылуынан және ерітінділер арқылы өңделген топырақта аммоний хлориді тұздарының тұнбасынан туындауынан болатындығы көрсетілді.

Әдебиеттер

- 1.Han Z,WangT, Dong Z, Hu Y, Yao Z Chemical stabilization of mobile dunefields along a highway in the Taklimakan Desert of China, 2007,. J Arid Environ vol 68:p -260–270https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.05.007
- 2.Acting locally cooperating regionally. Combating desertification in Central Asia//Published by: Deutsche GesellschaftfürTechnischeZusammenarbeit (GTZ) GmbH –German Technical Cooperation.- 2007, vol 20
- 3.B. Knorr, Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. Masters Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, USA, 2014.

4.M.Nemati,G.Voordouw,Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ, *Enzyme Microb. Technol*, 2003, vol 33 pp. 635–642.[https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00191-1)

5.M. Maleki, S. Ebrahimi, F. Asadzadeh, M. EmamiTabriziPerformance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil*Int. J. Environ. Sci. Technol*,2016,vol. 13 pp. 937–944. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-015-0921-z>

6.H.Yasuhara, K.Hayashi, M. Okamura, Evolution in mechanical and hydraulic properties of calcite-cemented sand mediated by biocatalyst, *Geo-FrontiersAdvances, Geotechnical Engineering*,2011,pp. 3984–3992.[https://doi.org/10.1061/41165\(397\)407](https://doi.org/10.1061/41165(397)407)

7.H.Yasuhara, D. Neupane, K. Hayashi, M. Okamura, Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, *Soils Found*,2012, vol 52 (3) pp. 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.011>

8.D. Neupane, H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Putra, Distribution of grout material within 1-m sand column in insitu calcite precipitation technique, *Soils Found*,2015, pp.1512–1518. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.015>

9.Choi, S.-G.; Chang, I.; Lee, M.; Lee, J.-H.; Han, J.-T.; Kwon, T.-H. Review on Geotechnical Engineering Properties of Sands Treatedby Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Biopolymers. *Constr. Build. Mater.* 2020, 246, 118415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118415>

10. Almajed, A.; Abbas, H.; Arab, M.; Alsabhan, A.; Hamid, W.; Al-Salloum, Y. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based Methods for Ecofriendly Stabilization of Different Types of Natural Sands. *J. Clean. Prod.* 2020, 274, 122627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122627>

11.Miftah, A.; Tirkolaei, H.K.; Bilsel, H. Bio-Precipitation of CaCO₃ for Soil Improvement: A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*2020, 800, 012037 DOI 10.1088/1757-899X/800/1/012037

12.Almajed, A.A. Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Improvement. Ph.D. Thesis, Arizona State University,Phoenix, AZ, USA, 2017.

13.GuptaR., Kienzler K., MartiusC., MirzabaevA., OweisT., de PauwE., QadirM., ShideedK., SommerR., ThomasR., SayreK., CarliC., SaparovaA., BekenovM., SanginovS., NepesovM., and IkramovR. Research prospectus: a vision for sustainable land management research in Central Asia. //Sustainable Agriculture in Central Asia and the Caucasus,2009, pp.– 81.

14.Pratama, G.B.S.; Yasuhara, H.; Kinoshita, N.; Putra, H. Application of Soybean Powder as Urease Enzyme Replacement on EICPMethod for Soil Improvement Technique. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*,2021, pp.-622. 012035 DOI: 10.1088/1755-1315/622/1/012035

References

- 1.Han Z,WangT, Dong Z, Hu Y, Yao Z Chemical stabilization of mobile dunefields along a highway in the Taklimakan Desert of China, 2007,. *J Arid Environ* vol 68: p -260–270<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.05.007>
2. Acting locally cooperating regionally. Combating desertification in Central Asia//Published by: Deutsche GesellschaftfürTechnischeZusammenarbeit (GTZ) GmbH –German Technical Cooperation.- 2007, vol 20
3. Knorr B. Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. Masters Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, USA, 2014.
4. Nemati M., Voordouw G. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ, *Enzyme Microb. Technol*, 2003, vol 33 pp. 635–642. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00191-1)

5. Maleki M., Ebrahimi S., Asadzadeh F., Emami M. Tabrizi Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 13 pp. 937–944. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-015-0921-z>
6. Yasuhara H., Hayashi K., Okamura M. Evolution in mechanical and hydraulic properties of calcite-cemented sand mediated by biocatalyst, *Geo-Frontiers Advances, Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 3984–3992. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)407](https://doi.org/10.1061/41165(397)407)
7. Yasuhara H., Neupane D., Hayashi K., Okamura M. Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, *Soils Found*, 2012, vol 52 (3) pp. 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.011>
8. Neupane D., Yasuhara H., Kinoshita N., Putra H., Distribution of grout material within 1-m sand column in insitu calcite precipitation technique, *Soils Found*, 2015, pp. 1512–1518. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.015>
9. Choi, S.-G.; Chang, I.; Lee, M.; Lee, J.-H.; Han, J.-T.; Kwon, T.-H. Review on Geotechnical Engineering Properties of Sands Treated by Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Biopolymers. *Constr. Build. Mater.* 2020, 246, 118415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118415>
10. Almajed, A.; Abbas, H.; Arab, M.; Alsabhan, A.; Hamid, W.; Al-Salloum, Y. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based Methods for Ecofriendly Stabilization of Different Types of Natural Sands. *J. Clean. Prod.* 2020, 274, 122627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122627>
11. Miftah, A.; Tirkolaei, H.K.; Bilsel, H. Bio-Precipitation of CaCO₃ for Soil Improvement: A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 800, 012037 DOI 10.1088/1757-899X/800/1/012037
12. Almajed, A.A. Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Improvement. Ph.D. Thesis, Arizona State University, Phoenix, AZ, USA, 2017.
13. Gupta R., Kienzler K., Martius C., Mirzabaev A., Oweis T., de Pauw E., Qadir M., Shideed K., Sommer R., Thomas R., Sayre K., Carli C., Saparova A., Bekenov M., Sanginov S., Nepesov M., and Ikramov R. Research prospectus: a vision for sustainable land management research in Central Asia. // *Sustainable Agriculture in Central Asia and the Caucasus*, 2009, pp. – 81.
14. Pratama, G.B.S.; Yasuhara, H.; Kinoshita, N.; Putra, H. Application of Soybean Powder as Urease Enzyme Replacement on EICP Method for Soil Improvement Technique. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2021, pp. -622. 012035 DOI: 10.1088/1755-1315/622/1/012035

РЕЗЮМЕ

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРМЕНТНО ИНДУЦИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ

М.Е. Даулеткул¹, Б.Т. Жанатаев¹, З.Б. Тұңғышбаева¹

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая

Алматы, Казахстан

(e-mail: Dauletkul_meirzhan@mail.ru)

В данной работе были проведены исследования по определению раствора EICP (Enzymatic Induced Calcite Precipitation), то есть метода ферментативно-индуцированного осаждения карбоната кальция. В основе биогеотехнического метода лежит образование карбоната кальция (CaCO₃) путем каталитического гидролиза мочевины с использованием фермента уреазы. Раствор EICP содержит 0,65 М мочевины, 0,86 М хлорид кальция (CaCl₂) и фермент уреазы концентрацией 4 г/л. В результате обработки этим раствором образовались кристаллы, соединяющие частицы песка между собой, в процессе образования карбонатного осаждения снижается проницаемость почвы, обеспечивая прочностные свойства почвы. Однако это требует больших затрат из-за необходимости большого

количества фермента уреазы, используемого для изготовления раствора, созданного на основе метода.

В этом исследовании фермент был выделен из соевых бобов как натуральный сырьевой продукт, заменяющий фермент уреазу. Почва (Актауский песок) была обработана раствором EICP, благодаря активности ферментов, получена высокая степень осаждения карбоната. Кроме того, было обнаружено, что мочевины и хлорид кальция выделяются из сточных вод, образующихся в процессе обработки почвы ферментативно-индуцированным раствором карбоната кальция, но уреазные ферменты не содержатся в этих сточных водах. Фермент реагирует с мочевиной и карбонатом кальция, содержащимися в почве, с осаждением карбоната кальция и образованием связей между частицами почвы. Образующиеся кристаллы карбоната кальция укрепляют участки почвы, превращая ее из рыхлого в уплотненное состояние.

Прочность полученных образцов на сжатие была измерена, образцы были исследованы под сканирующим электронным микроскопом.

Ключевые слова: Биогеотехника, кальций хлорид, укрепление, мочевины, EICP.

SUMMARY

THE USE OF ENZYME-INDUCED PRECIPITATION OF CALCIUM CARBONATE TO STRENGTHEN DEGRADED SOILS

M.E. Dauletkul¹, B.T. Zhanataev¹, Z.B. Tungyshbaeva¹

¹*Abai Kazakh National Pedagogical University*

Almaty, Kazakhstan

(e-mail: Dauletkul_meirzhan@mail.ru)

In this work, research was carried out to determine the effectiveness of strengthening the structure of degraded soil using EICP (Enzymatic Induced Calcite Precipitation) solution, i.e. enzyme-induced calcium carbonate precipitation method. The biogeotechnical method is based on the formation of calcium carbonate (CaCO_3) by catalytic hydrolysis of urea using the enzyme urease. The EICP solution contains 0,65 M urea, 0,86M calcium chloride (CaCl_2) and urease enzyme with a concentration of 4 g/L. Treatment with this solution resulted in the formation of crystals that connect sand particles to each other, in the process of carbonate deposition formation reduces soil permeability, providing soil strength properties.

In this study, the enzyme was isolated from soybeans as a natural raw material product replacing the enzyme urease. Soil (Aktau sand) was treated with EICP solution, due to enzyme activity, high degree of carbonate precipitation was obtained. In addition, it was found that urea and calcium chloride are excreted from wastewater generated during tillage with an enzymatically induced calcium carbonate solution, but urease enzymes are not contained in these wastewater. The enzyme reacts with urea and calcium carbonate contained in the soil, precipitating calcium carbonate and forming bonds between soil particles. The resulting calcium carbonate crystals strengthen the soil areas, turning it from a loose to a compacted state. The compressive strength of the obtained samples was measured and the samples were examined under scanning electron microscope.

Keywords: Biogeotechnics, calcium chloride, reinforcement, urea, EICP.

Авторлар туралы мәлімет:

Даулеткүл М.Е. – докторант, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазыбек би 30, Алматы, Қазақстан.

Жанатаев Б.Т. – докторант, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазыбек би 30, Алматы, Қазақстан.

Тұңғышбаева З.Б. –биология ғылымдарының докторы, профессор, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазыбек би 30, Алматы, Қазақстан.

Dauletkul M. E.-doctoral student, Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Kazybek bi 30, Almaty, Kazakhstan.

Zhanatayev B.T. – PhD student, Abai Kazakh Kazakh National Pedagogical University, 30 Kazybek Bi Street, Almaty, Kazakhstan.

Tungyshbayeva Z.B. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Abai Kazakh National Pedagogical University, 30 Kazybek Bi str., Almaty, Kazakhstan.