

INFLUENCE OF MINERAL BINDING ADDITIVES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS AND CONSOLIDATION BEHAVIOUR OF TECHNOLOGICAL MINE WASTE

Veselin Balev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: veselinbalev@mgu.bg

ABSTRACT. An applied geotechnical assessment is presented of the potential for accelerated dewatering, development of structural bonding, and modification of the shear behaviour of mining process waste through the combined use of geosynthetic drainage elements and mineral binding additives. The analysis includes results from static sedimentation tests, observations of filtration through geotextile and a three-dimensional drainage element, a field experimental cell, and direct shear tests. Natural sedimentation provides only limited dewatering and does not result in the rapid formation of a load-bearing structure. For the mixture containing 1.58% cement + 0.5% PowerCem, a substantial increase in the cohesive component of shear strength is observed, accompanied by a decrease in the angle of internal friction. This indicates a transition towards more pronounced structurally cohesive behaviour rather than a universal increase in shear strength under all normal stress conditions.

Key words: mine tailings; dewatering; consolidation; geosynthetic drainage; cement stabilisation/PowerCem.

ВЛИЯНИЕ НА МИНЕРАЛНИ СВЪРЗВАЩИ ДОБАВКИ ВЪРХУ ЯКОСТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСОЛИДАЦИОННОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ МИННИ ОТПАДЪЦИ

Веселин Балеv

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София E-mail: veselinbalev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Представена е приложна геотехническа оценка на възможността за ускорено водоотделяне, формиране на структурна свързаност и изменение на сръзвещото поведение на технологичен минен отпадък чрез комбинирано използване на геосинтетични дренажни елементи и минерални свързващи добавки. Анализирани са резултати от утаяване в неподвижна среда, наблюдения върху филтрация през геотекстил и пространствен дренажен елемент, полева експериментална клетка и изпитвания на директно сръзване. Естественото утаяване осигурява ограничено водоотделяне и не води до бързо формиране на носеща структура. При състава 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem се установява съществено нарастване на кохезионната компонента на сръзвещата устойчивост при едновременно понижаване на ъгъла на вътрешно триене. Това показва преход към по-изразено структурно-кохезионно поведение, а не универсално повишаване на сръзвещата якост във всички условия на нормално натоварване.

Ключови думи: технологични минни отпадъци; водоотделяне; консолидация; геосинтетичен дренаж; циментова стабилизация/PowerCem.

1. Въведение

Управлението на технологичните минни отпадъци е съществен елемент от геотехническата безопасност на хвостохранилищата и съоръженията за клетъчно депониране. При фино-дисперсни хвостови материали инженерното поведение се определя от взаимосвързани процеси на утаяване, отделяне на свободна вода и такава от порите, консолидация и развитие на сръзвеща устойчивост. Поради това устойчивостта на системата не зависи единствено от геометрията на депониране, а и от скоростта, с която материалът преминава от суспензионно към по-устойчиво структурирано състояние (Blight, 2010; Jewell & Fourie, 2015; Global Tailings Review, 2020; International Commission on Large Dams, 2022).

При клетъчно депониране естественото водоотделяне често протича бавно. Това удължава технологичния цикъл, затруднява последващото надграждане и може да доведе до локални деформации при недостатъчно дрениране. В практиката се използват различни решения: геосинтетични дренажни елементи, контролирана коагулация, циментова стабилизация, както и комбинация между дренаж и минерални добавки (Benzaazoua et al., 2004; Fall et al., 2008; Koerner, 2012; Tariq & Yanful, 2013; Yilmaz & Fall, 2017; Wilson et al., 2018; Cui & Fall, 2019; Islam & Shang, 2019).

Целта на настоящата работа е да даде оценка на комбинираното приложение на дренажни елементи и минерални свързващи добавки влияе върху водоотделянето, консолидационното поведение и

интерпретираните параметри на сръзвеща якост на технологичен минен отпадък. Основният акцент е поставен върху разграничаването между фрикционно поведение и нарастване на кохезионната компонента в резултат на създаване на структурни връзки след период от време.

2. Теоретична рамка

Първичното утаяване на отделни частици в разрежена суспензия може ориентировъчно да се опише чрез закона на Стокс:

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho_w) g d^2}{18\mu} \quad (1)$$

където:

- v_s – скоростта на утаяване, m/s;
- ρ_s – плътност на частиците, kg/m³;
- ρ_w – плътност на водата, kg/m³;
- g – земно ускорение, m/s²;
- d – еквивалентен диаметър на частицата, m;
- μ – динамичен вискозитет, Pa·s.

При концентрирани хвостови суспензии този модел има само ориентировъчно значение, тъй като се проявява стеснено утаяване, взаимодействие между частиците и промяна в ефективната порьозност. (Mitchell & Soga, 2005).

Филтрацията през дренажни и геосинтетични елементи може да се разглежда чрез закона на Darcy:

$$q = kiA \quad (2)$$

където:

q е дебитът, m^3/s ;
 k – коефициент на филтрация, m/s ;
 i – хидравличен градиент;
 A – филтрационна площ, m^2 .

В реална среда ефективната филтрационна способност намалява поради колматаж, формиране на филтърна кора и локално запушване на контактната повърхност между фино-дисперсията отпадък и геосинтетичния материал (Palmeira & Gardoni, 2002; Koerner, 2012; International Organization for Standardization [ISO], 2019; Du et al., 2022).

Времето развитие на едномерната консолидация може да се представи чрез безразмерния времеви фактор:

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2} \quad (3)$$

където:

T_v е времеви фактор;
 c_v – коефициент на консолидация, m^2/s ;
 t – време, s ; H_d – дренажен път, m .

Намаляването на H_d чрез дренажни елементи е основна предпоставка за ускорено отвеждане на поровата вода (Ahmed, 2018).

Интерпретацията на срязващата якост е извършена чрез критерия на Mohr–Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (4)$$

където:

τ_f е якостта на срязване, kPa или MPa ;
 c' – ефективна или интерпретирана кохезионна компонента;
 σ'_n – ефективно нормално напрежение;
 φ' – ефективен или интерпретиран ъгъл на вътрешно триене.

При стабилизирани фини материали изменението на c' и φ' трябва да се разглежда отделно, защото минералните добавки могат да увеличат структурното свързване, без непременно да повишат трикционната компонента (Ъгъла на вътрешно триене) (Consoli et al., 2007; Peng et al., 2021).

3. Материал и методика

Изследваният материал е технологичен минен отпадък, разглеждан като концентрирана суспензия със съдържание на твърда фаза около 60–65 %. Експерименталната програма обхваща: утаяване в неподвижна среда; наблюдение върху филтрацията през геотекстилна повърхност; наблюдение на поведението при пространствен дренажен елемент; полеви експеримент в клетка с приблизителен обем $1 m^3$; и директно срязване за три състава: контролен МТО, МТО + 1.58 % цимент и МТО + 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem.

Добавката PowerCem е разглеждана като минерална добавка към циментова стабилизация. В техническата литература за продуктите от системата PowerCem тя се описва като прахообразна добавка на база синтетични зеолити и алкални/алкалоземни компоненти, която се използва съвместно с хидравлично свързващо вещество

(цимент) за подобряване на механичните параметри, водоплътността, структурната свързаност и други на циментосвързани материали (Holmes, 2015; Wu, 2015; Eyo et al., 2021). Поради търговския характер на продукта в статията не се приема скрит химичен състав, а се интерпретира само установеният инженерен геотехнически ефект.

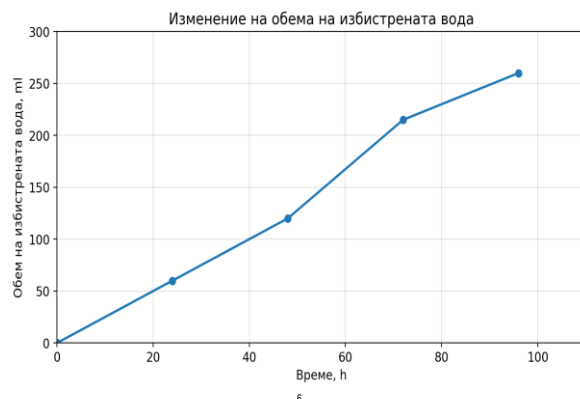
Таблица 1. Обобщение на експерименталната програма

Изследване	Основна цел	Интерпретиран резултат
Утаяване	Оценка на първичното водоотделяне	Обем и височина на избистрената вода
Геотекстилна филтрация	Оценка на взаимодействието МТО – геотекстил	Колматаж и намаляване на ефективната филтрация
Пространствен дренаж	Оценка на отвеждането на водата от порите	По-устойчив дренажен път
Полева клетка	Наблюдение на консистенция и форма във времето	Поведение на модифицирания материал на 28-ия ден
Директно срязване	Определяне на параметри по Mohr–Coulomb	c' и φ' за трите състава

Таблица 2. Изследвани състави при директно срязване

Състав	Цимент	PowerCem	Инженерна цел
Контролен МТО	0 %	0 %	Измодифициран материал
МТО + цимент	1.58 %	0 %	Самостоятелен ефект с цимент
МТО + цимент + PowerCem	1.58 %	0.5 %	Комбиниран ефект на цимент и минерална добавка

Методиката има приложен характер. Поради ограничената налична първична информация резултатите от директното срязване се разглеждат като интерпретационни, а не като окончателни проектни стойности. За проектно използване е необходимо допълване с повторяемост, контрол на водното съдържание, плътност, време на зреене, скорост на срязване и дълговременна устойчивост.



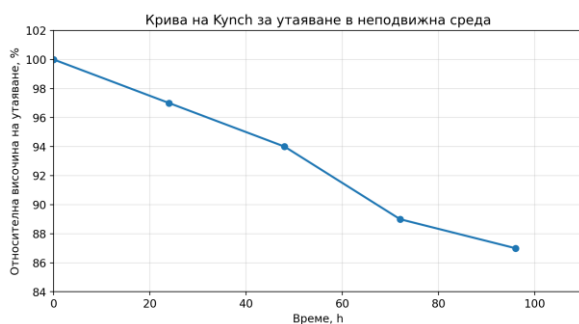
Фиг. 1. Изменение на обема на избистрената вода при утаяване в неподвижна среда.

4. Резултати

Резултатите от утаяването показват постепенно отделяне на избистрена вода в рамките на 96 h. При първоначален обем на пулпа 2000 ml и съдържание на твърда фаза 62.4 % обемът на избистрената вода достига 260 ml. Това съответства на около 13 % от началния обем и показва, че материалът отделя свободна вода, но без да формира бързо стабилна носеща структура.

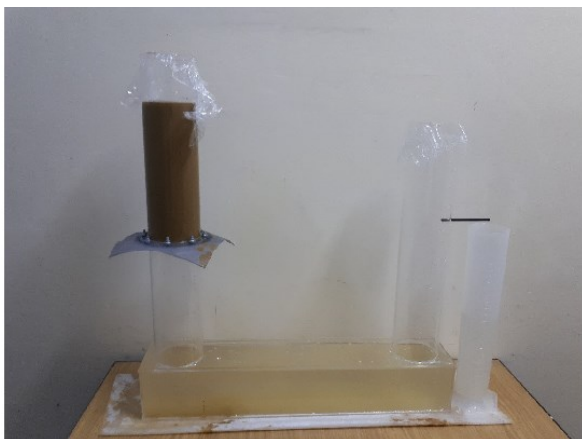
Таблица 3. Резултати от утаяване в неподвижна среда

Време, h	Обем избистрена вода, ml	Дял спрямо началния обем, %
0	0	0.0
24	60	3.0
48	120	6.0
72	215	10.8
96	260	13.0



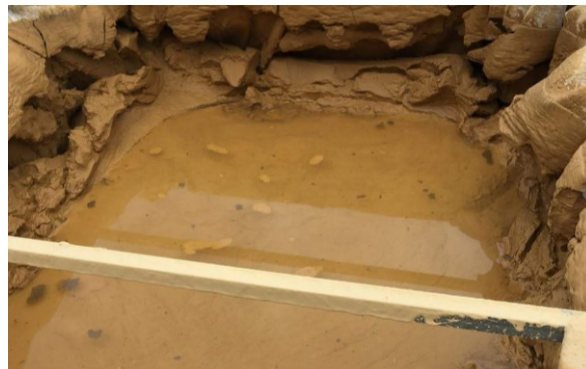
Фиг. 2. Крива на Кунц, представяща изменението на височината на утайката във времето.

Наблюденията върху геотекстилната повърхност показват, че класическата филтрационна повърхност е чувствителна към колматаж при контакт с фино-дисперсен отпадък. Формирането на филтерна кора ограничава активната филтрационна площ и намалява ефективния коефициент на филтрация. За разлика от това пространственият дренажен елемент осигурява устойчив път за отвеждане на поровата вода и намалява влиянието на локалното запушване.



Фиг. 3. Опитна постановка с пространствен дренажен елемент и модифициран технологичен минен отпадък

Полевата клетка потвърждава приложното значение на комбинираното дренiranje и стабилизиране. На 28-ия ден модифицираният материал показва значително по-добра формоустойчивост в сравнение с очакваното поведение на нестабилизиран концентриран пулп. Наблюдаваните пукнатини се интерпретират като резултат от водоотделяне, обемни изменения и развитие на крехко структурирана повърхностна зона, а не като доказателство за равномерно подобрене в целия обем.



Фиг. 4. Полеви експеримент: състояние на не модифицирания материал в опитна клетка на 28-ия ден



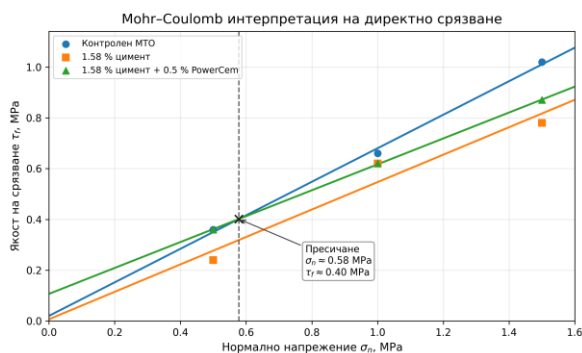
Фиг. 5. Полеви експеримент: състояние на модифицирания материал в опитна клетка на 28-ия ден

Най-съществена информация за механизма на подобряване дават резултатите от директното срязване. За контролния МТО е определена интерпретирана кохезионна компонента $c' \approx 20.0$ kPa и ъгъл на вътрешно триене $\varphi' \approx 33.4^\circ$. При състава с 1.58 % цимент са получени $c' \approx 6.7$ kPa и $\varphi' \approx 28.4^\circ$, което не показва положителен самостоятелен ефект на цимента при тази дозировка и условия. При състава 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem е определена стойност $c' \approx 106.7$ kPa при $\varphi' \approx 27.0^\circ$.

Таблица 4. Интерпретирани параметри по Mohr-Coulomb от директно срязване

Материал	Нормални напрежения, МПа	Якост на срязване, МПа	c' , kPa	φ' , °
Контролен МТО	0.5; 1.0; 1.5	0.36; 0.66; 1.02	20.0	33.4
1.58 % цимент	0.5; 1.0; 1.5	0.24; 0.62; 0.78	6.7	28.4
1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem	0.5; 1.0; 1.5	0.36; 0.62; 0.87	106.7	27.0

На фиг. 6 е показана е пресечната точка между зависимостите за контролния МТО и комбинирия състав при $\sigma_n \approx 0.58$ МПа.



Фиг. 6. Линейна интерпретация по Mohr-Coulomb на резултатите от директно срязване за контролен МТО, МТО с 1.58 % цимент и МТО с 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem

Таблица 5. Линейна интерпретация на резултатите от директно срязване по Mohr-Coulomb

Състав	Зависимост $\tau_f - \sigma_n$	c' , kPa	φ' , °	R^2	Инженерна интерпретация
Контролен МТО	$\tau_f = 0.020 + 0.660\sigma_n$	20.0	33.4	0.997	Преобладаващо фрикционно поведение. Не се установява положителен самостоятелен ефект.
МТО + 1.58 % цимент	$\tau_f = 0.0067 + 0.540\sigma_n$	6.7	28.4	0.948	Повишена кохезионна компонента и структурно свързване.
МТО + 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem	$\tau_f = 0.1067 + 0.510\sigma_n$	106.7	27.0	0.999	

Забележка: Зависимостите са изведени чрез линейна регресия на резултатите от директно срязване при нормални напрежения 0.5, 1.0 и 1.5 МПа.

Линейната интерпретация на получените резултати може да се представи чрез следните зависимости, където τ и σ_n са в МПа:

$$\tau_1 = 0.020 + 0.660\sigma_n \quad \tau_1 \text{ контролен МТО} \quad (5)$$

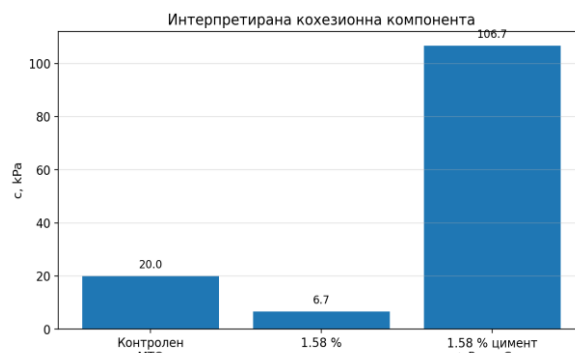
$$\tau_2 = 0.0067 + 0.540\sigma_n \quad \tau_2 \text{ МТО + 1.58 \% цимент} \quad (6)$$

$$\tau_3 = 0.1067 + 0.510\sigma_n \quad (7)$$

$$\tau_3 \text{ МТО + 1.58 \% цимент + 0.5 \% PowerCem}$$

От тези зависимости следва, че комбинираната добавка води до многократно нарастване на кохезионната компонента, но не и до нарастване на ъгъла на вътрешно триене. Напротив, φ' остава по-нисък от този на контролния материал. Пресечната точка между зависимостите за контролния МТО и състава с 1.58 % цимент + 0.5 % PowerCem е при $\sigma_n \approx 0.58$ МПа и $\tau_f \approx 0.40$ МПа. Следователно при нормални напрежения под тази стойност комбинирият състав показва по-благоприятна изчислителна срязваща устойчивост, докато при по-високи нормални напрежения контролният МТО може да покаже по-висока срязваща якост поради по-голямата фрикционна компонента. Правилната инженерна интерпретация е, че

подобряването се реализира основно чрез структурно свързване и формиране на привидна/ефективна кохезия, особено при ниски до умерени нормални напрежения.



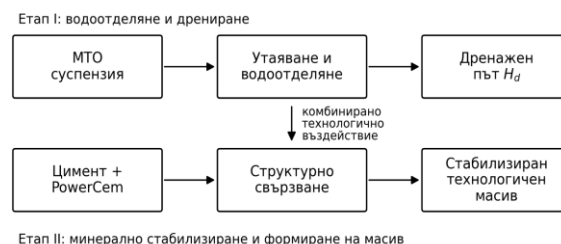
Фиг. 7. Съпоставка на интерпретираната кохезионна компонента c' за трите състава

5. Дискусия

Получените резултати очертават три различни механизма на поведение. Първият е гравитационно утаяване, при което се отделя част от свободната вода, но процесът остава бавен и сам по себе си не е достатъчен за бързо преминаване към устойчиво състояние. Вторият механизъм е дрениране, при което ефективността зависи от устойчивостта на дренажния път и от чувствителността към колматаж. Третият механизъм е минерално-свързана стабилизация, при която циментът и добавката от системата PowerCem променят структурата на материала чрез развитие на свързващи продукти и контакти между частиците.

Важно е да се подчертае, че увеличението на c' не означава автоматично повишаване на срязващата якост във всички диапазони на нормално напрежение. Поради по-ниската стойност на $\tan\varphi'$ правата за стабилизирият състав се пресича с правата на контролния материал. Това налага резултатите да се използват само след проверка на реалния диапазон на нормалните напрежения в конкретната клетка или депонирано тяло.

Допълнително внимание изисква диапазонът на нормалните напрежения 0.5–1.5 МПа. Ако тези стойности са лабораторно зададени и реални, следва да се обоснове тяхното съответствие с напрегнатото състояние в депонирия МТО. Ако в първичната документация е използвана различна единица, например 50–150 kPa, таблицата и интерпретацията трябва да бъдат коригирани. Това е съществен контролен пункт преди окончателно подаване на статията.



Етап II: минерално стабилизиране и формиране на масив

Фиг. 8. Концептуална схема на взаимодействието между утаяване, дрениране, стабилизация и развитие на срязваща устойчивост

6. Ограничения на изследването

Настоящата статия има характер на приложна интерпретация върху от експериментални данни. Не са налични достатъчно подробни данни за зърнометричен състав, минерален състав, специфична плътност, начално водно съдържание, порьозност, повтораемост на изпитванията, време и условия на зреене, както и скорост на срязване. Поради това параметрите c' и φ' трябва да се разглеждат като интерпретирани лабораторни стойности, а не като директни проектни параметри.

За проектно приложение са необходими допълнителни изпитвания: определяне на водно съдържание и плътност преди срязване; повтораемост за всеки състав; изпитвания на 7, 14, 28 и 56 дни; едномерна консолидация; филтрационни изпитвания при натоварване; и проверка на дълговременна якост при цикли на намокряне и изсъхване. Само след такава калибрация може да се премине към проектни параметри за конкретна технология на депониране.

7. Заключение

При разглеждания технологичен минен отпадък естественото утаяване води до ограничено водоотделяне – около 260 ml избистрена вода от 2000 ml първоначален пулп за 96 h. Този процес е недостатъчен като самостоятелна мярка за бързо формиране на устойчиво състояние при клетъчно депониране.

Геотекстилните филтрационни повърхности показват риск от колматаж при контакт с фино-дисперсен МТО. Пространствените дренажни елементи са по-подходящи, защото осигуряват по-устойчив път за отвеждане на поровата вода и ограничават влиянието на локалното запушване.

При комбинираното приложение на 1.58 % цимент и 0.5 % PowerСem се установява съществено нарастване на кохезионната компонента на срязващата устойчивост – от $c' \approx 20.0$ kPa при контролния МТО до $c' \approx 106.7$ kPa. Едновременно с това ъгълът на вътрешно триене намалява от $\varphi' \approx 33.4^\circ$ до $\varphi' \approx 27.0^\circ$. Следователно ефектът от добавката следва да се тълкува като формиране на структурно-кохезионно поведение и подобряване на формоустойчивостта на материала, а не като универсално повишаване на срязващата якост в целия диапазон на нормални напрежения.

Получените резултати са приложими като основа за технологична оценка и избор на посока за оптимизация, но не са достатъчни за директно проектиране. Преди практическо използване е необходима допълнителна лабораторна програма, обвързана с реалните напрежения, воден режим, геометрия на клетките и изискваната дълговременна устойчивост.

Литература

Ahmed, S. I. (2018). Development of a model to predict consolidation of tailings. *Environmental Geotechnics*, 5(5), 271–284. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00013>

Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.022>

Blight, G. E. (2010). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press.

Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., & Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197–205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))

Cui, L., & Fall, M. (2019). Mathematical modelling of cemented tailings backfill: A review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(6), 389–408. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1453320>

Du, C., Xu, C., Yang, Y., & Wang, J. (2022). Filtration performance of nonwoven geotextile filtering fine-grained soil under normal compressive stresses. *Applied Sciences*, 12(24), Article 12638. <https://doi.org/10.3390/app122412638>

Eyo, E. U., Ng'ambi, S., & Abbey, S. J. (2021). Inclusion of RoadCem additive in cementitious materials for soil stabilization. In *IFCEE 2021* (pp. 166–176). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784483411.016>

Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. G. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(1), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.08.005>

Global Tailings Review. (2020). *Global industry standard on tailings management*. International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, & Principles for Responsible Investment.

Holmes, N. (2015). Structural properties of concrete materials containing RoadCem. *Journal of Construction Engineering*, 2015, Article 795080. <https://doi.org/10.1155/2015/795080>

International Commission on Large Dams. (2022). *Tailings dam safety* (Bulletin No. 194).

International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil—Part 10: Direct shear tests (ISO 17892-10:2018)*.

International Organization for Standardization. (2019). *Geotextiles and geotextile-related products—Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load (ISO 11058:2019)*.

Islam, S., & Shang, J. Q. (2019). Coagulation enhanced electrokinetic settling of mature fine oil sands tailings. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(2), 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.04.012>

Jewell, R. J., & Fourie, A. B. (2015). *Paste and thickened tailings: A guide* (3rd ed.). Australian Centre for Geomechanics.

Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Palmeira, E. M., & Gardoni, M. G. (2002). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2), 97–115. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00004-3)

Peng, X., Guo, L., Liu, G., Yang, X., & Chen, X. (2021). Experimental study on factors influencing the strength distribution of in situ cemented tailings backfill. *Metals*, 11(12), Article 2059. <https://doi.org/10.3390/met11122059>

Tariq, A., & Yanful, E. K. (2013). A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices. *Journal of Environmental Management*, 131, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.039>

Wilson, G. W., Kabwe, L. K., Beier, N. A., & Scott, J. D. (2018). Effect of various treatments on consolidation of oil sands fluid fine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(8), 1059–1066. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0268>

Wu, P. (2015). *Cement stabilized materials with use of RoadCem additive* [Doctoral dissertation, Delft University of Technology]. ISBN 978-94-6203-866-0.

Yilmaz, E., & Fall, M. (Eds.). (2017). *Paste tailings management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8>