



ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ПРАКТИЧЕСКИ ПОДХОДИ ЗА ПРОБОВЗЕМАНЕ НА „НАРУШЕН“ И „НЕНАРУШЕН“ ХВОСТОВ МАТЕРИАЛ

Николай Милев

Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр.
Смирненски“ № 1, 1046 София, България, milev_fte@uacg.bg

РЕЗЮМЕ

Пробовземането на „ненарушен“ хвостов материал представлява едно от най-сериозните предизвикателства в геотехническото инженерство, особено когато материалът е водонаситен, несвързан и често в рохко състояние. За да се счита една проба за действително ненарушена, е необходимо да се запазят не само плътността и водното съдържание, но и оригиналната структура на материала. Настоящият доклад проследява пълния „жизнен път“ на пробата – от добиването ѝ чрез дадена сондажна система до постъпването ѝ в лабораторен апарат. Представени са практически решения за минимизиране на полевото влияние върху пробите и методи за надеждно определяне на ключови физични характеристики – обемна плътност, водно съдържание и коефициент на порите в естествено състояние. Докладът предлага интегриран подход, съчетаващ подходящи сондажни техники, пробовземачи и „in-situ“ методи (напр., стандартизиран пенетрационен тест – Standard Penetration Test, SPT), с цел постигане на максимална достоверност при определянето на тези основополагащи показатели, които са критично важни за всяка последваща оценка на инженерногеоложкия риск, включително риска от втечняване.

Ключови думи: хвост, пробовземане, ненарушена проба, сондажна система, ядрово сондиране, физичен показател, стандартизиран пенетрационен тест

CHALLENGES AND PRACTICAL APPROACHES FOR SAMPLING “DISTURBED” AND “UNDISTURBED” TAILINGS MATERIAL

Nikolay Milev

Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo
Simirnenki Blvd., Sofia 1164, Bulgaria, milev_fte@uacg.bg

ABSTRACT

Sampling of “undisturbed” tailings material poses significant challenges in geotechnical engineering, especially when the material is water-saturated, cohesionless, and often in a very loose state. For a sample to be truly considered undisturbed, it is essential to preserve not only its in-situ density and moisture content but also its original structure. This paper traces the entire lifecycle of a geotechnical sample—from field recovery using advanced drilling systems to its final placement in a laboratory testing device. Practical solutions are presented for minimizing disturbance during sampling, handling, and transport, along with robust methods for accurately determining key physical parameters such as natural bulk density, water content, and in-situ void ratio. The study proposes an integrated approach that combines suitable core drilling techniques, dedicated samplers, and in-situ testing methods (e.g., Standard Penetration Test, SPT) to ensure maximum reliability in defining these fundamental parameters. These properties form the basis for all subsequent analyses and are particularly critical when assessing static and dynamic liquefaction potential in tailings storage facilities.

Key words: tailings, sampling, undisturbed sample, drilling system, core drilling, physical properties, Standard Penetration Test, liquefaction



ВЪВЕДЕНИЕ

В последните десетилетия, на фона на нарастващата индустриализация и интензивното добивно производство, безопасността и устойчивостта на хвостохранилищата придобиха критично значение в сферата на геотехническото инженерство. Хвостът, представляващ среда от водонаситени, несвързани и често слабо уплътнени материали, създава сериозни предизвикателства при неговото геотехническо характеризиране. Оценката на риска от втечняване, прогнозните деформации, коефициентите на сигурност във връзка с общата устойчивост и разработването на надеждни числени модели изискват изходни данни с висока степен на достоверност, което поставя пробовземането в основата на целия процес.

Понятието „ненарушена“ проба в този контекст не се изчерпва единствено с минимално физическо нарушаване на материала. За да се счита една проба за действително представителна за условията на терена, необходимо е да се запазят: (1) обемната плътност, (2) водното съдържание и (3) структурата на хвоста, която често е определяща за реагирането на масива при външно натоварване, особено в условията на циклично въздействие. Това изисква внимателен подбор на методите за пробовземане, съхранение, транспорт и лабораторна подготовка, обхващащи пълния „жизнен цикъл“ на пробата – от добиването ѝ на терен до нейното изпитване в лаборатория – Фиг. 1.



Фиг. 1. „Жизнен цикъл“ при пробовземане на хвостов материал

Настоящият доклад разглежда практическите аспекти и ограничения, свързани с пробовземането на хвостов материал, като акцентът е поставен върху възможностите за добиване на относително „ненарушени“ проби, при внимателен контрол, чрез подходящи сондажни техники, комбинирани с „in-situ“ тестове. Основната цел е да се предложат реалистични и приложими методи за точно (прецизно) определяне на гореописаните три базови, но критично важни физични показателя, които служат като отправна точка за всички последващи инженерни анализи, включително оценка за статично и динамично втечняване – акцент на настоящия доклад.

ЦЕЛИ НА ПРОУЧВАТЕЛНОТО СОНДИРАНЕ И ВИДОВЕ ПРОБИ

В тази част на доклада са дадени предписания (методология) относно възможен начин за вземане на проби от хвостохранилища. Също така е внесена допълнителна яснота относно това как би могло да се процедира при добиване на образци с разнообразна структура и консистенция.

От водещо значение е вземането на проби хвост, които са с „оригиналния“ си зърнометричен състав и се намират под водното ниво – за да има даден материал склонност към втечняване,



необходимо условие е той да бъде под нивото на подпочвените води, т.е. той да бъде водонаситен (степен на водонасищане, S_r , със стойности равни или близки до 1.0).

С оглед на модерните специализирани дейности и изследвания, свързани с оценката на склонността към втечняване, вземането на проби от хвост е логически разделено в две направления (тестване на „ненарушен“ и „нарушен“ материал):

- „Ненарушен“ материал (от проучвателно ядково сондиране с тристенна система):
 - Определяне на 2 (два) физични показателя:
 - Обемно тегло в естествено състояние, γ_n ;
 - Естествено водно съдържание, w_n^* .

*Забележка: Под водното ниво, очакванията са естественото водно съдържание, w_n , и максималното водно съдържание, w_r , на практика да съвпадат, т.е. $w_n \approx w_r$, и съответно степента на водонасищане, $S_r = w_n/w_r$, да бъде със стойности равни или много близки до 1.0. Технологиата на изграждането на повечето хвостохранилища предполага, че водата в порите на материала е гравитационна и капилярна (свободна) – тя запълва всички пори и системата е двуфазна (състои се единствено твърди частици и вода).
 - Оформяне на хоризонтална повърхност с естествено състояние на материала в сондажа (без обрушки) за целите на провеждането на статични пенетрационни тестове (SPT) – например, най-външната тръба от тристенната система (описана подробно в настоящия доклад) осигурява стабилност на сондажа във всички етапи на изпълнение.
- „Нарушен“ материал (от проучвателно ядково сондиране с тристенна система и/или кух стандартизиран накрайник от SPT):
 - Определяне на всички останали физични показатели:
 - Зърнометричен състав (включващ подробни стойности за фината фракция) с изчислен коефициент на разнорънестост, U_c ;
 - Процентно съдържание на фини фракции при $d_{0.075}$;
 - Максимален и минимален коефициент на порите, e_{max} и e_{min} ;
 - Специфично обемно тегло, γ_s ;
 - Пластични показатели по [1], w_L , w_P и I_P – за тези проби, които притежават пластичност (ако има такива).
 - Лабораторни опити с цикличен триосов апарат и динамични методи (измерване на скорост на разпространение на напречни вълни в образците чрез бендер-елементи) – проби от хвост с възстановена структура;
 - Лабораторни опити с цикличен мултипосочен апарат за плоскостно срязване и динамични методи (измерване на скорост на разпространение на напречни вълни в образците чрез бендер-елементи) – проби от хвост с възстановена структура;
 - Допълнителни лабораторни опити – например, опити с монотонен триосов апарат с дигитална система за запис и възможност за измерване на порен натиск и обемни деформации – калибрирането на конститутивния (физичния) модел NorSand, [9], предполага изпитване на проби при различно напрегнато състояние (ефективни напрежения в образеца) и при различна плътност („плътни“ и „рохки“ образци).

От гореизложеното става ясно, че основната цел на проучвателното ядково сондиране с тристенна система (или тънкостенни тръби тип „шелби“) е както да бъде взет материал, който е с „оригиналния“ си зърнометричен състав (ненарушената структура е необходимо условие единствено за определяне на обемно тегло в естествено състояние, γ_n , и водно съдържание, w_n и/или w_r), така и да бъде оформен „чист“ сондаж, в който няма обрушване, преди започване на SPT.

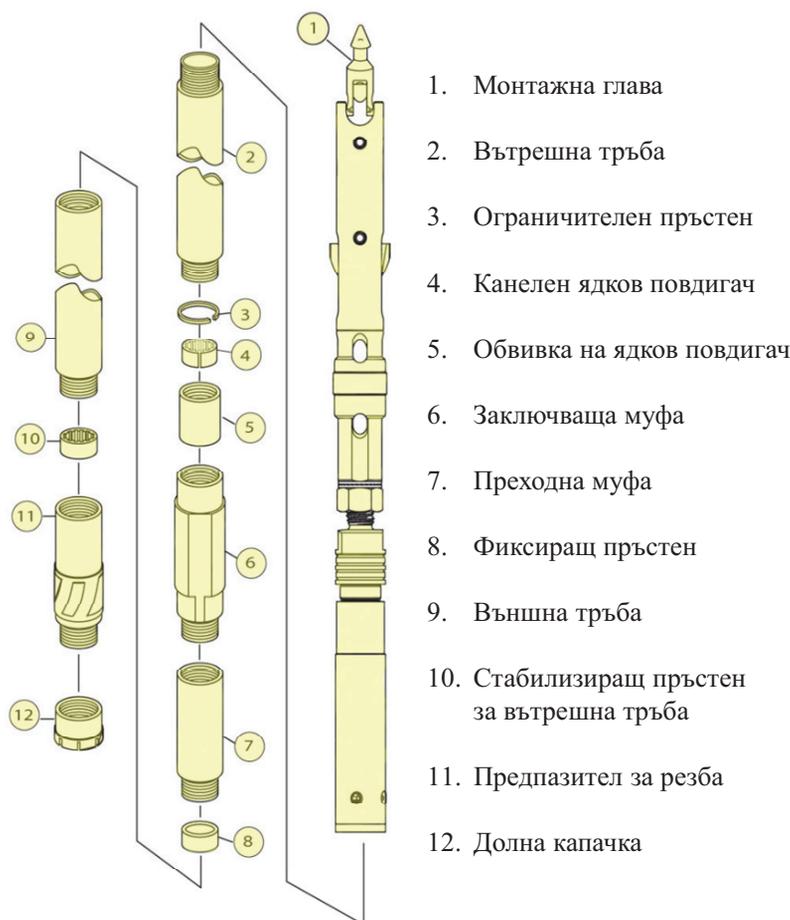
ТРИСТЕННА СИСТЕМА ЗА ЯДКОВО СОНДИРАНЕ С ИЗВЛЕКАЕМА ТРЪБА

Този метод за провеждане на проучвателно ядково сондиране, достъпен с наличната в България механизация, не прави компромис относно качеството на последващите лабораторни изследвания. Технологиата с тристенна система за ядково сондиране с извлекаема тръба (т. нар.



„triple-tube core barrel drilling“) в замисъла си първоначално е разработена с цел вземане на проби от скали. Въпреки това, същият метод е стандартизиран и успешно се прилага за получаване на непрекъснати почвени профили, съответно позволява вземането на образци, нужни за целите на специализирани лабораторни тестове – в някои случаи „ненарушени“ проби (за определяне на обемно тегло в естествено състояние, γ_n , и водно съдържание, w_n и/или w_r), а в други – „нарушени“ (при определяне на повечето физични показатели и провеждане на лабораторни опити с цикличен триосов апарат и/или цикличен мултипосочен апарат за плоскостно срязване) – съгласно [4].

Този способ предвижда сондиране с проникване в дълбочина чрез едновременно въртене на двете външни тръби, а по време на този процес между тях навлиза промивната течност (вода, полимер и/или други), която допълнително стабилизира сондажа. Материалът (хвостът) остава изолиран в третата, най-вътрешна, тръба, която стои неподвижна (не се върти по време на проникване). Това позволява да бъде взета проба с минимално отмиване на материала (т.е. минимална промяна на „оригиналния“ зърнометричен състав). Примери за подобен тип системи са HQ3 (вътрешен диаметър – 61.1 mm) и PQ3 (вътрешен диаметър – 83.0 mm) – Фиг. 2.



Фиг. 2. Компоненти на тристенната система за ядково сондиране с извлекаема тръба (източник: Hole Products)

В контекста на [13] (Таблица 3.1 от съответния документ), методът за вземане на проби Качество 1 е необходимо да бъде Тип А съгласно [16] – Таблица 1.



Табл. 1. БДС EN 1997-2:2007 (Таблица 3.1) – [13]

Свойства на почвите/класификация на качеството	1	2	3	4	5
Постоянни свойства на почвите					
Зърнометричен състав	*	*	*	*	
Съдържание на вода	*	*	*		
Плътност, коефициент на плътността, водопропускливост	*	*			
Компресионни свойства, якост на срязване	*				
Характеристики, които може да бъдат определени					
Последователност на пластове	*	*	*	*	*
Граници на напластяването - общи очертания	*	*	*	*	
Граници на напластяването - точно	*	*			
Граници на Atterberg, специфична плътност, съдържание на органични примеси	*	*	*	*	
Съдържание на вода	*	*	*		
Плътност, коефициент на плътността, порестост, водопропускливост	*	*			
Компресионни свойства, якост на срязване	*	*			
Категории при вземане на проби съгласно EN ISO 22475-1	A		B		C

Табл. 2. Категории при вземане на проби – [5]

Категория	Метод за пробовземане	Коментар	Клас по качество на пробите
A	Тръбни пробовземачи, ротационно сондиране, блоково пробовземане	Пробовземачи тип "U100" са неподходящи за меки глини	1–5
B	SPT пробовземач, "MOSTAP" проби при "отворено" пробовземане		3–5
C	Насипно състояние (торби)	Структурата на материала е напълно нарушена	5

Табл. 3. Приложимост на категории при вземане на проби за получаване на параметри – [5]

Метод за пробовземане и клас по качество на пробите	†	Тип почва или скала		
		Скала	Едрозърнеста почва	Финозърнеста почва
Категория А 1–5	Н	Тип скала	Тип почва	Тип скала
		Мощност на пластове	Мощност на пластове	Мощност на пластове
		Зърнометричен състав	Зърнометричен състав	Зърнометричен състав
		Водно съдържание	Водно съдържание	Водно съдържание
		Плътност	Химични тестове	Плътност
		Якост на срязване		Якост на срязване
		Деформируемост		Деформируемост
		Филтрация / водопропускл.		Филтрация / водопропускл.
		Химични тестове		Химични тестове
				Атербергови граници
		Плътност		
	М		Якост на срязване	
			Деформируемост	
			Филтрация / водопропускл.	
Категория В 3–5	Н	Тип скала	Тип почва	Тип почва
		Мощност на пластове	Мощност на пластове	Мощност на пластове
		Зърнометричен състав	Зърнометричен състав	Зърнометричен състав
		Водно съдържание	Химични тестове	Химични тестове
		Плътност		Атербергови граници
				Водно съдържание
	М		Водно съдържание	
	L		Плътност	

†Приложимост: Н = висока, М = средна, L = ниска



Таблица 2 и Таблица 2 дават допълнителна информация относно категориите при вземане на проби А, В и С – [5]. Възможна и относително лесна за приложение техника би била базирана на възприемането на подход А (проучвателно ядково сондиране с тристенна система с извлекаема тръба) в комбинация с подход В (кух стандартизиран накрайник от SPT), съответно дадени с пунктирана и плътна линия в таблиците.

Освен вече споменатите [13] (рефериращ към [16]) и [4], редица други световни документи предписват гореописания подход при вземане на проби – [8], [10] и [12].

ВИДОВЕ ПРОБОВЗЕМАЧИ

- Дебелостенен инструмент от две части („split-barrel sampler“)

Дебелостенният пробовземач от две части („split-barrel sampler“ – SBS) се използва за вземане на нарушени и ненарушени проби в различните типове почви (Фигура 3 – горе-ляво). Той често се прилага в тандем с SPT, както е посочено в [2]. Размерите на инструментите са със стандартни дължини от 457 до 610 mm и вътрешни диаметри (ID), вариращи от 38.1 до 114 mm. SBS с ID 38.1 mm е традиционно предпочитан поради установените си корелации с почви с разнообразни свойства, докато по-големите диаметри се използват в чакълести почви или за широкообхватни тестове за класификация. SBS с ID 38.1 mm има външен диаметър 51 mm и ID на режещия накрайник – 34.9 mm. За да се улесни пробовземането в несвързани почви, в „главата“ на инструмента се вгражда сферичен клапан, който предотвратява изтичане на пробата под налягане от водата по време на изваждане. Режещият накрайник може да се откача, което позволява лесно изваждане на пробата. След изваждане образците обикновено се затварят херметически в торбички или други съдове за съхранение. За да се предотврати загуба на материал по време на извличане, особено в случай на пясък, дребен чакъл, или почва с ниска пластичност, често се използват стоманени или пластмасови държачи – те позволяват навлизането на материал по време на сондиране, но се затварят при излизане.

- Тънкостенни („шелби“) тръби

Тънкостенната тръба, често наричана „шелби“ тръба (Фигура 3 – горе-дясно и долу-център), е инструмент, който се използва за вземане на ненарушени проби от свързана почва, предимно за изпитване на якост на срязване (триосови тестове) и консолидация (компресионни тестове).



Фиг. 3. Дебелостенен инструмент от две части, горе-ляво, тънкостенни тръби, горе-дясно, и добита проба хвостов материал чрез „шелби“ тръба (пример от България), долу-център



Този тип инструменти обикновено имат външен диаметър от 51 до 76 mm и дължини между 700 до 900 mm. Те са изработени от материали като въглеродна стомана, неръждаема стомана или месинг, като неръждаемата стомана или месингът се предпочитат при висок клас проби, въпреки по-голямото триене. Процедурата по пробовземане предвижда прилагане на контролирана сила, предавана чрез хидравличната система на сондажната машина към тръбата, а от там и в почвата (хвоста). За да се гарантира целостта на пробата, инструментът (пробовземачът) обикновено се вкарва с по-малко от цялата си дължина. След изваждането му краищата на тръбата се запечатват с восъчни или О-пръстенови тапи, след което се съхраняват в контролирана среда, за да се предотвратят промени в структурата или водното съдържание на образците. За по-качествено добиване на проби често се използват тръби с по-голям диаметър, а „главата“ на пробовземача е снабдена с клапан за преминаване на вода. Целесъобразно е налягането (силата), необходимо за вкарване на тръбата, да бъде записано от оператор – тази техника за вземане на почвени проби е подробно описана в [3].

СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБИ СПОРЕД КОНСИСТЕНЦИЯТА ИМ

Тъй като състоянието на материала в хвостохранилищата варира от „много рохко“ до „много сбито“, хвостът обикновено има разнообразна структура (консистенция) в отделните зони на пробовземане в дълбочина.

В настоящата част от доклада са описани три базови типа случая, които обикновено се очакват по време на сондиране и съответно при вземане на образци: Тип 1 (най-благоприятен); Тип 2 (междинен); Тип 3 (най-неблагоприятен).

- Тип 1: Проби с цилиндрична форма или близка до такава

В зоните с най-сбит материал (често на относително голяма дълбочина) обикновено се очаква да бъде добит хвост, който приема формата на пробовземача (най-вътрешната тръба от тристенната система за проучвателно ядрово сондиране) – цилиндрична форма или близка до такава.



Фиг. 4. Тип 1 (проби с цилиндрична форма или близка до такава): материал от хвостохранилище в България – взет чрез тристенна система за проучвателно ядрово сондиране

Често хвостът има разнообразен зърнометричен състав (при различна относителна плътност и пластични показатели на материала). Пробите, попадащи в Тип 1 са най-подходящи за последващи задълбочени (специализирани) изследвания – вземането и запазването на такъв тип ядки обикновено е с най-голям приоритет. Впоследствие те могат да послужат и за прецизно определяне на обемна плътност и водно съдържание (при известен обем на образеца – на база на диаметъра на тръбата) – възможно е и да бъдат подготвени проби за целите на определянето на тези физични показатели.

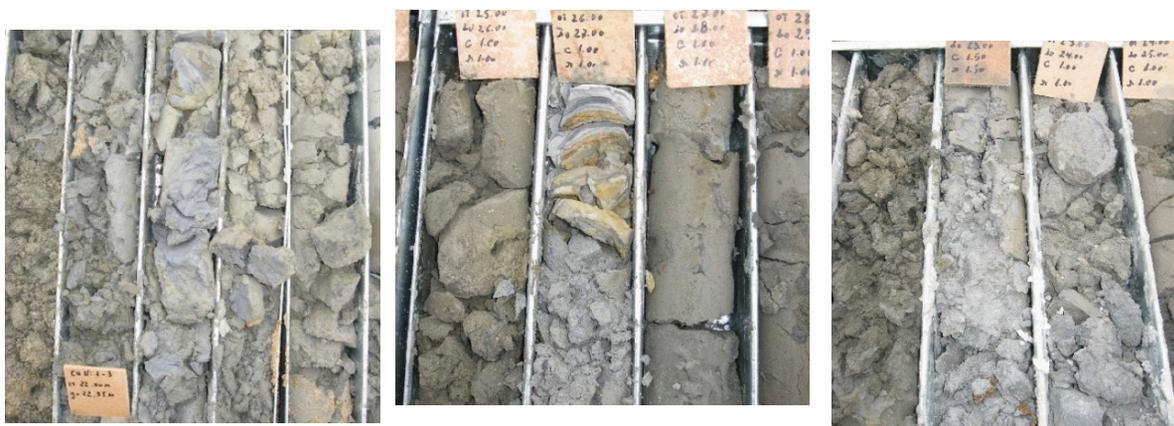


Фигура 4 илюстрира начина, по който се очаква да изглеждат пробите, взети от относително голяма дълбочина в хвостохранилища – цилиндрична форма или близка до такава.

- Тип 2: Проби с неправилна форма – късове и отделни парчета

В някои случаи на проучване е невъзможно вземането на проби с цилиндрична или близка до такава форма – тогава материалът се добива в състояние на късове и отделни парчета хвост. Въпреки това, тези проби с неправилна форма позволяват определянето на обемна плътност и водно съдържание съгласно [15] и [14]. Нещо повече, те могат да послужат и за материал за изграждане на проби с възстановена структура при провеждане на динамични (циклични) лабораторни опити.

Фигура 5 демонстрира начина, по който изглеждат проби Тип 2.



Фиг. 5. Тип 2 (проби с неправилна форма – късове и отделни парчета): материал от хвостохранилище в България – взет чрез тристенна система за проучвателно ядково сондиране

- Тип 3: Силно оводнен и много рохък материал в насипен вид

В плитките зони (в близост до повърхността) често хвостът е в много рохко състояние и/или е силно оводнен, а в някои случаи – във водонаситено състояние – Фиг. 6.

Това може да направи невъзможно вземането на проби чрез тристенна система за целите на провеждане на лабораторни изпитвания за определяне на обемна плътност и водно съдържание съгласно [15] и [14]. Въпреки това голяма част от тестовете (например: изпитвания за определяне на зърнометричен състав и процентно съдържание на фини фракции при $d_{0.075}$, максимален и минимален коефициент на порите, e_{max} и e_{min} , специфично обемно тегло, γ_s , и пластични показатели по [1], w_L , w_P и I_P , както и динамични / циклични лабораторни опити – образци с възстановена структура) могат да бъдат направени безпроблемно.



Фиг. 6. Тип 3 (силно оводнен и много рохък материал в насипен вид): материал от хвостохранилище в България – взет чрез тристенна система за проучвателно ядково сондиране



Добитият материал, в насипен вид, следва да бъде съхранен надеждно в подходящи за целта торбички („bulk bag samples“ в контекста на [5] и [13]), тъй като той може да бъде използван впоследствие.

МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОБЕМНА ПЛЪТНОСТ И ВОДНО СЪДЪРЖАНИЕ

За всички лабораторни опити, касаещи определянето на обемна плътност и водно съдържание, следва да бъдат спазени изискванията на [15] и [14].

При невъзможност за вземане на проби в някои участъци (например: случаи в плитка зона със силно оводнен и много рохък материал в насипен вид) могат да бъдат възприети индиректни методи за дефиниране на относителна плътност, D_r – на база стандартизирани пенетрационни тестове, SPT, и/или статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск (CPTu).

- Тип 1: Изпитване на „ненарушени“ проби за определяне на обемна плътност и водно съдържание

За случаите, в които могат да бъдат изкарани проби в цилиндрична форма или близка до такава (образци с правилна форма и ненарушена структура), следва да бъде възприет един или повече от следните допустими подходи на [15]: 1) Метод с линейно измерване; 2) Метод с потапяне във флуид; 3) Метод с изместване на флуид.

- Тип 2: Изпитване на „ненарушени“ проби за определяне на обемна плътност и водно съдържание и/или предпоставка за водонаситено състояние

За случаите, в които могат да бъдат изкарани проби в цилиндрична форма или близка до такава (образци с неправилна форма – късове и отделни парчета), следва да бъде възприет един или повече от гореописаните 3 (три) подхода на [15].

Като алтернатива, в случай, че късовете се раздробяват лесно и/или се разпадат, може да се възприеме предпоставката, че под водното ниво естественото водно съдържание (w_n) и максималното водно съдържание (w_r), на практика съвпадат, т.е. $w_n \approx w_r$, и съответно степента на водонасищане, $S_r = w_n/w_r$, е със стойности равни или много близки до 1.0. Технологиите на изграждането на повечето хвостохранилища предполага, че водата в порите на материала е гравитационна и капилярна (свободна) – тя запълва всички пори и системата е двуфазна (състои се единствено твърди частици и вода).

В такъв случай, за целите на изпитването на съответната проба, е необходимо да бъде взето парче (т.е. буца или къс) от материала и да бъде прибрано в подходящ съд (който впоследствие да послужи и за изсушаване на образеца) – важно е единствено масата на пробата да бъде измерена при естествено състояние, а промяната на обема (вследствие раздробяване) по време на транспортиране не играе роля. От там насетне следва:

- Определя се специфичното тегло, γ_s , по стандартна процедура от нарушен образец (с помощта на пикнометър);
- Определя се естествено водно съдържание, w_n , съгласно [14] (разликата в масата на образеца преди и след изсушаването му, т.е. масата на водата – M_w , разделена на масата на образеца след изсушаването му, т.е. масата на твърдата фаза – M_d) – обемът не играе роля;
- С основание се приема, че под водното ниво естественото водно съдържание и максималното водно съдържание съвпадат, т.е. $w_n \approx w_r$ (степен на водонасищане, $S_r \approx 1.0$) – хвостът се разглежда като двуфазна система, в която всички пори са запълнени с вода;
- Определя се коефициентът на порите, $e = (\gamma_s \times w_r) / \gamma_w$, където:
 - γ_w – обемно тегло на водата (~10 kN/m³).
- Обемът на порите, n , се получава директно от коефициента на порите, $e: n = e / (1 + e)$;



- Определя се обемната плътност на скелета, γ_d : $\gamma_d = (1 - n) \times \gamma_s$;
- Определя се обемната плътност в естествено състояние, γ_n : $\gamma_n = (1 + w_n) \times \gamma_d$.
- Тип 3: Индиректно определяне на обемна плътност и водно съдържание – на база на стандартизирани пенетрационни тестове (SPT) и/или статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск (CPTu)

Ако в някои случаи в плитка зона със силно оводнен и много рохък материал в насипен вид е невъзможно вземането на проба, то е възможно възприемане на индиректни методи на база корелации от стандартизирани пенетрационни тестове, SPT, и/или статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск (CPTu). Процедурата е свързана със следните дейности и предпоставки:

- Определя се специфичното обемно тегло, γ_s , по стандартна процедура от нарушен образец (с помощта на пикнометър);
- Определят се максимален и минимален коефициент на порите, e_{\max} и e_{\min} , по стандартни процедури от нарушени образци;
- Определя се $(N_1)_{60}$ -стойност – според установката на опита и дълбочината на провеждане на теста, на база на N_{SPT} -стойността, получена от стандартизиран пенетрационен тест, SPT. Възможно е и възприемане на корелации за определяне на относителна плътност, D_r , от статични пенетрационни тестове с измерване на порен натиск, CPTu, които често са дори по-целесъобразни в етапа на проучване;
- Възприема се класическата и общоприета връзка между $(N_1)_{60}$ -стойност от стандартизиран пенетрационен тест, SPT, и относителна плътност, D_r , както следва – [11]:

$$D_r = (N_1)_{60} / C_D^*$$

където:

C_D – коефициент на калибриране в диапазона от 36 до 60 (най-често възприеманата стойност при оценка на риска от втечняване е 46 – съгласно [7].

*Забележка: C_D може да бъде прецизиран допълнително на база на разликата между e_{\max} и e_{\min} (диапазона на порите), Фигура 7 – [6].

По този начин уравнението добива вида:

$$D_r = \left[\left\{ \left[N_{\text{SPT}} \times (e_{\max} - e_{\min}) \cdot 1.7 \right] / 9 \right\} \times \left\{ (98 \text{ kPa} / \gamma_v')^{1/2} \right\} \right]^{1/2},$$

където:

γ_v' – вертикално напрежение от геоложки товар (ефективно напрежение).

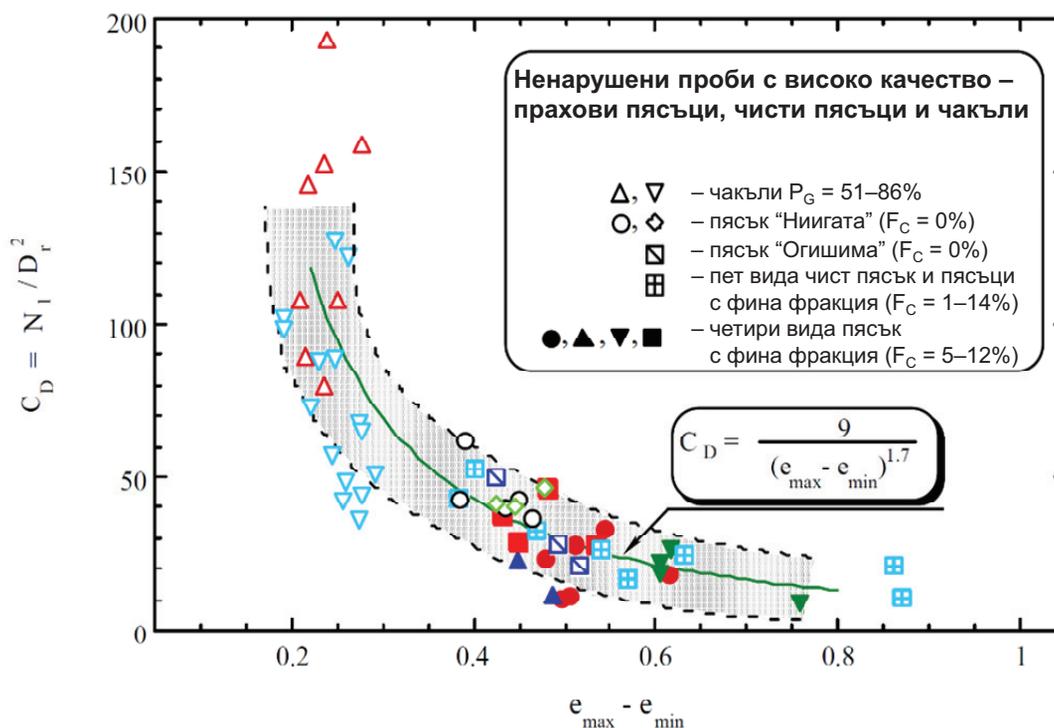
- Определя се коефициентът на порите, e , на база общоизвестна връзка от класическата земна механика: $e = e_{\max} - [D_r \times (e_{\max} - e_{\min})]$;
- Обемът на порите, n , се получава директно от коефициента на порите, e : $n = e / (1 + e)$;
- Определя се максималното водно съдържание, w_r : $w_r = e \times (\gamma_w / \gamma_s)$,

където:

γ_w – обемно тегло на водата ($\sim 10 \text{ kN/m}^3$).

- С основание се приема, че под водното ниво естественото водно съдържание и максималното водно съдържание съвпадат, т.е. $w_n \approx w_r$ (степен на водонасищане, $S_r \approx 1.0$) – хвостът се разглежда като двуфазна система, в която всички пори са запълнени с вода;
- Определя се обемната плътност на скелета, γ_d : $\gamma_d = (1 - n) \times \gamma_s$;
- Определя се обемната плътност в естествено състояние, γ_n : $\gamma_n = (1 + w_n) \times \gamma_d$.

С цел още по-голяма надеждност, гореописаната процедура ще бъде подкрепена от геофизични измервания (например: измерени скорости на разпространение на сеизмични вълни – V_p и V_s).



Фиг. 7. Корелация между $(N_1)_{60}/D^2$ и разликата между e_{max} и e_{min} (диапазон на коефициента на порите) – [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пробовземането на водонаситени, несвързани и често рохки хвостови материали е процес с висока степен на техническа сложност, който изисква внимателен подбор на технологии и стриктно спазване на процедурите във всяка фаза – от добиването на пробата до нейното лабораторно изпитване. Въпреки че пълното съхраняване на първоначалното състояние на материала е практически трудно постижимо, чрез използване на усъвършенствани сондажни системи и добре структурирана работна програма е възможно да се добият проби с минимално отклонение от действителните теренни условия.

Представената методология цели да осигури висока степен на достоверност при определянето на обемна плътност, водно съдържание и коефициент на порите – три основни физични показателя, които имат пряко отражение върху оценката на инженерногеоложкия риск, включително риска от втечняване. Чрез комбиниране на пробовземане с подходящи сондажни инструменти, „in-situ“ тестове и лабораторни изпитвания (включително циклични и монотонни), може да бъде постигната необходимата прецизност за последващи числени и аналитични анализи.

Предложеният подход е приложим в широк спектър от проучвателни ситуации и може да послужи като основа за разработване на проектно-специфични процедури при оценка на хвостохранилища с потенциален риск, свързан с устойчивостта им.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Atterberg, A. (1911). Die plastizität der tone. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*, 1, 10–43. In German
- [2] ASTM D1586/D1586M-18. (2018). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [3] ASTM D1587/D1587M-15. (2015). *Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.



- [4] ASTM D3550-01. (2012), *Standard Practice for Ring-Lined Barrel Sampling of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- [5] Bond, A., & Harris, A. (2006). *Decoding eurocode 7*. CRC Press.
- [6] Cubrinovski, M., & Ishihara, K. (1999). Empirical correlation between SPT *N*-value and relative density for sandy soils. *Soils and Foundations*, 39(5), 61-71.
- [7] Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2010). SPT-based liquefaction triggering procedures. *Rep. UCD/CGM-10, 2*, 4-13.
- [8] Japanese Geotechnical Society. (2009). *JGS 1223: Method for Obtaining Soil Samples Using Rotary Triple-Tube Sampler*. JGS Standards – Geotechnical and Geoenvironmental Investigation Methods, Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan
- [9] Jefferies, M. G. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1), 91-103.
- [10] Mayne, P. W., Christopher, B. R., & DeJong, J. (2002). Subsurface investigations – geotechnical site characterization. *No. FHWA NHI-01*, 31.
- [11] Meyerhof, G. G. (1957). Discussion of “Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 83(1), 1155-11.
- [12] New Zealand Geotechnical Society. (2017). *Earthquake Geotechnical Engineering Practice – Module 2: Geotechnical Investigations for Earthquake Engineering*. Ministry of Business, Innovation and Employment (MBIE), Wellington, New Zealand.
- [13] БДС EN 1997-2. (2024). *Еврокод 7: Геотехническо проектиране. Част 2: Изследване и изпитване на земната основа*. Български институт за стандартизация (БИС)
- [14] БДС EN ISO 17892-1:2015/A1. (2022). *Геотехнически изследвания и изпитвания. Лабораторни изпитвания на почвите. Част 1: Определяне съдържанието на вода. Изменение 1*. Български институт за стандартизация (БИС)
- [15] БДС EN ISO 17892-2. (2015). *Геотехнически изследвания и изпитвания. Лабораторни изпитвания на почвите. Част 2: Определяне на обемна плътност*. Български институт за стандартизация (БИС)
- [16] БДС EN ISO 22475-1. (2022). *Геотехнически изследвания и изпитвания. Методи за вземане на проби и измервания на подземните води. Част 1: Технически принципи на вземане на проби от почви, скали и подземни води*. Български институт за стандартизация (БИС)