

ОЦЕНКА ОПАСНОСТТА ОТ ВТЕЧНЯВАНЕ НА ХВОСТА ОТ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ «ЛЮЛЯКОВИЦА» - ОПРЕДЕЛЯНЕ ДИНАМИЧНАТА ЯКОСТ НА ХВОСТА

Стефчо Стойнев, Антонио Лакос

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; stoynev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Направени са изследвания за физикомеханичните свойства на хвоста от стената на хвостохранилище „Люляковица“. Въз основа на анализа на данните за зърнометричния състав и плътностните характеристики на хвостовия материал са избрани две плътностни състояния, които са характерни за отделните зони на разреза. Проведени са динамични триаксиални изследвания на проби за всяка една от избраните плътности. За всяка една от тях е построена зависимостта между коефициента на цикличните напрежения $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ и броя на колебанията N, което представлява паспорт на динамичната якост на хвоста за съответната плътност, изразяваща граничното напрегнато състояние при динамични въздействия.

ESTIMATION OF THE LIQUEFACTION HAZARD OF THE TAILINGS FROM LYULYAKOVITZA TAILINGS DAM – DETERMINATION OF THE DYNAMIC STRENGTH OF THE TAILINGS

Stefcho Stoynev, Anotnio Lakov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; stoynev@mail.bg

ABSTRACT. The tailing materials of the tailing dam wall "Lyulyakovitza" were studied in order to identify their physical and mechanical properties. Based on the grain-size distribution and in-situ the dry density two dry density values were identified as characteristic for the different zones of compaction of the profile the wall. For each of them a series of specimens were tested under triaxial dynamic compression conditions and the relationships between the cyclic stress ratio $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ and the applied number of cycles N at yield were derived, that are considered as limit state curves of the tailings under dynamic conditions.

Въведение

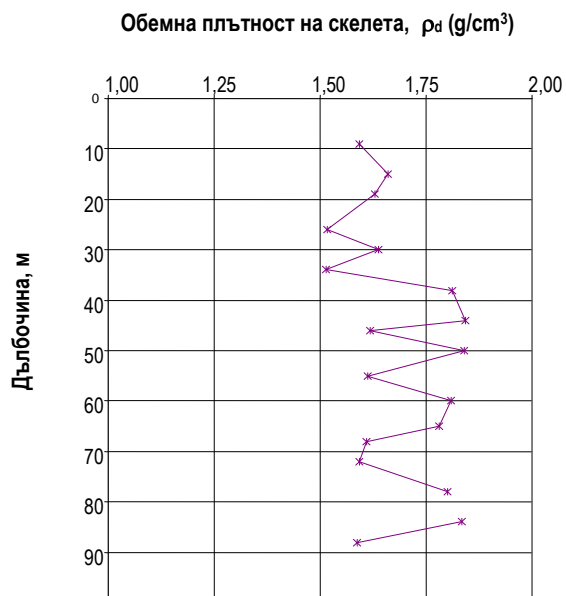
Дългосрочните планове за развитие на рудник Асарел изискват да се извърши надграждане на стената на хвостохранилище „Люляковица“ до кота 900. Един от анализите, който трябва да бъде направен при изследванията за устойчивостта ѝ, е свързан с оценка на опасността от втечняване на хвостовия материал при сеизмични въздействия. Най-достоверният от редицата методи, които съществуват за оценка опасността от втечняване на водонаситени слаби почви, са аналитичните методи. Те се основават на сравнение на сръзващите напреженията, индуцирани в почвата от сеизмично въздействие с динамичната якост на водонастената почва, определени в лабораторни условия чрез циклични изпитвания. Най-често тези изпитвания се провеждат в апарати за просто сръзване и триаксиални апарати, откъдето носят наименованията си двата основни метода за лабораторни изследвания – *cyclic simple shear test* и *cyclic triaxial compression test*.

Определянето на динамичната якост на хвоста при настоящото изследване е извършено чрез циклични триаксиални опити, като пробите от хвоста са изследвани при две степени на уплътненост, които са най-характерни за неговото състояние.

Характеристика на хвоста

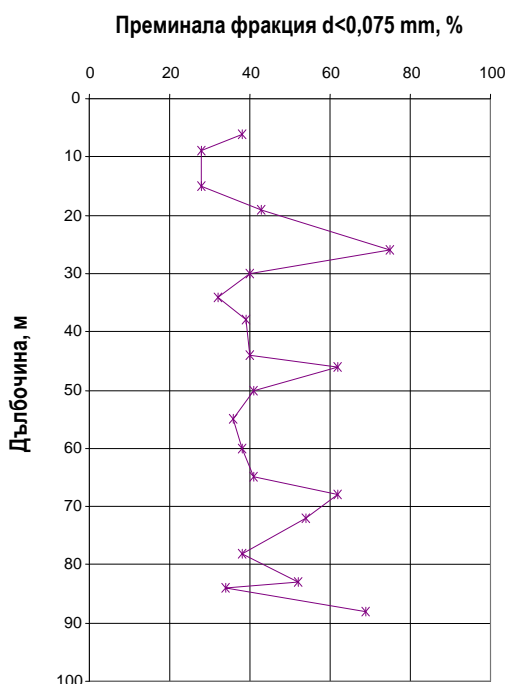
Стената на хвостохранилището се изгражда чрез наливане на отпадъка от обогатителната фабрика. Основата на стената е каменно-насипна с кота на короната 750 m. Над тази кота надграждането на стената е изпълнявано чрез циклонирани хвост (до кота 793) и чрез директно наливане на пулпа по плажа, без частично предварително хидроциклонирани хвост. Веднъж годишно се изгражда дига с височина 3,0 m, върху която се монтира наливният тръбопровод. За изграждане на дигата се използва хидроциклонирани хвост, добит от към въздушната страна, непосредствено до последната наливна дига с помощта на хидроциклони, захранени директно от наливния пулпопровод. Предвижда се, тя да бъде надградена до височина 190 m (до кота 829).

Извършените сондажни, пенетрационни и лабораторни изследвания (Стойнев (ред.), 2014) показват, че над кота 782 хвостът се характеризира със сравнително ниски плътностни характеристики – обемната плътност на скелета се изменя от 1,51 g/cm³ до 1,88 g/cm³, средна стойност 1,62 g/cm³ (фиг. 1), а относителната плътност, определена от пенетрационните изследвания, се изменя от 0,26 до 0,65 (рахъл до средно сбит хвост).



Фиг. 1. Изменение на обемната плътност на скелета в дълбочина в сондаж МСЗ

Обработените данни за съдържанието на финните фракции в състава на хвоста (фиг. 2.) показват една значителна пространствена нееднородност по отношение на състава му. Независимо, че като класификация, преобладаващо хвоста се определя като „глинест пясък“, съдържанието на финните фракции с $d < 0,075$ mm се изменя от 20% до повече от 60%, като практически няма закономерност в разпределението им в стената.



Фиг. 2. Съдържание на финни фракции с $d < 0,075$ mm в хвоста в дълбочина в сондаж МСЗ.

За определяне на естествената степен на уплътненост на хвоста, за три броя проби са определени минималната и максималната стойност на обемната плътност на скелета. Минималната стойност ρ_{dmin} е определена чрез свободно насипване на пробата във въздушно сухо

състояние, а максималната стойност ρ_{dmax} е определена чрез уплътняване по метода Проктор. Получените стойности за ρ_{dmin} се изменят в границите $1,25 \div 1,31$ g/cm³ (средна стойност 1,27 g/cm³), а тези за ρ_{dmax} - в границите от $1,98 \div 2,02$ g/cm³ (средна стойност 2,01 g/cm³). Тези резултати, както и стойностите от обемната плътност на скелета ρ_d на пробите, показват, че средната стойност на относителната плътност I_D за хвоста е 0,46. Това го характеризира като средно сбит ($I_D = 0,33 \div 0,66$), като преобладаващата част от пробите имат относителна плътност в зоната на долната част на интервала.

Условията на залягане, зърнометричният състав, плътностното му състояние и гидрогеоложките условия на хвоста, изграждащ стената на хвостохранилището над кота 782, се характеризират със следните особености, които предполагат възможност за втечняването му при сеизмични въздействия, а именно:

- наличие на несвързани почви, дребнозърнести, с високо съдържание на прахова и глинеста фракции;
- рахло до средно сбито състояние на хвоста в тази зона;
- водонаситено състояние на хвоста под кота 802.

Средните стойности на определените физикомеханични характеристики, както и границите на тяхните изменения, са посочени в таблица 1.

Под кота 782 в разреза на стената преобладават поуплътнени зони, като обемната плътност на скелета на хвоста се изменя от 1,51 g/cm³ до 1,89 g/cm³ (средна стойност 1,69 g/cm³), а относителната плътност I_D , определена от пенетрационните изследвания, се изменя от 0,78 до 0,82 (сбит хвост). Данните от лабораторните изследвания на земни проби от този дълбочинен интервал. показват, че хвостът се намира в средно сбито и сбито състояние. Въпреки, че хвостът от тази зона е водонаситен, по-високата плътност и по-високото съпротивление на пенетрация индикират намалена опасност от втечняване.

Методи за определяне на динамичната якост на несвързани почви в лабораторни условия

Цикличното просто срязване (*cyclic simple shear test*) най-добре възпроизвежда естественото напрегнато състояние. За първи път е използвано от Seed, Peacock (1971). Изпълнението му, обаче, е свързано с редица проблеми (Seed et al., 1982; Hird, Hassona, 1990), свързани с:

- подготовката на представителни образци;
- реализирането на еднаква срязваща деформация в различните точки на образеца;
- реализирането на еднакво натоварване върху образеца;
- отстраняването на условията за концентрация на напрежения в отделни части от образеца.

Цикличните триаксиални изследвания (*cyclic triaxial compression test*) са по-широко използваният метод за определяне напреженията, при който възниква втечняване. Първата методика за провеждане на динамични изпитвания в триаксиални апарати е разработена от

Таблица 1.
Обобщена таблица с физико-механичните показатели от хвоста

Показател		мин.	сред-но	макс.	
Водно съдържание	W_n (%)	5,02	15,47	29,50	
Обемна плътност	ρ_n (g/cm ³)	1,80	1,99	2,20	
Специфична плътност	ρ_s (g/cm ³)	2,68	2,77	2,88	
Обемна плътност на скелета	ρ_d (g/cm ³)	1,51	1,62	1,88	
Порен коефициент	e	0,49	0,72	0,87	
Степен на водонасищане	S_R (%)	63,00	89,00	99,00	
БДС	Зърнометричен състав	% Чакъл	-	0	-
		% Пясък	-	51	-
		% Прах	-	38	-
		% Глина	-	11	-
	Граници на пластичност	W_L (%)	17,70	20,11	26,80
		W_P (%)	11,30	15,57	21,78
		I_P (%)	0,74	4,54	9,80
		I_c (%)	-4,52	0,88	5,86
Якост на срязване	CU триаксиален опит	c' (kPa)	3,80	21,07	39,80
		ϕ' (°)	26,00	27,67	29,00
	UU триаксиален опит	c (kPa)	-	3,00	-
		ϕ' (°)	-	1,00	-
	CD опит на плоско срязване	c (kPa)	6,64	11,30	16,80
		ϕ' (°)	23,04	31,59	35,54
Компресионни показатели	100 kPa	M100 (kPa)	34,78	53,65	65,57
	200 kPa	M200 (kPa)	72,20	96,71	112,68
	300 kPa	M300 (kPa)	117,65	126,95	143,20

Seed and Lee (1966). По-късно, изследвания върху динамичните триаксиални изпитания са извършвани от десетки автори. Всички те използват за основа предложената от Seed and Lee методика, като една значителна част от разработките са насочени към изучаване на факторите, влияещи върху резултатите от изпитанията. По-съществени в методологично отношение са разработките на Tatsuoka, Silver (1981), Seed, Anwar (1986), Brandon et al. (1991), Tatsuoka et al. (1986), Alarcon-Guzman et al. (1988), Ishihara (1993), Hyodo et al. (1994).

Като характеристика на напреженията, предизвикващи втечняване при триаксиалните изследвания се използва отношението $\sigma_{dp}/2\sigma_3'$ - коефициент на цикличните напрежения. Стойността на това отношение отразява условията в триаксиалната камера, при които възниква втечняване. Тези условия са различни в сравнение с естественото напрегнато състояние τ_h/σ_v' , което се използва при просто срязване. Поради тази причина, големината на цикличните напрежения, предизвикващи втечняване, определени по двата метода, ще имат

различни стойности. Връзката между двата параметъра, предложена от Seed and Peacock (1971), е следната:

$$(\tau_h/\sigma_v')_{\text{просто срязване}} = C_1(\sigma_{dc}/2\sigma_3')_{\text{триаксиално срязване}},$$

където: C_1 е корекционен коефициент за разликата между естественото напрегнато състояние на масива и условията в триаксиалната камера. Числената му стойност зависи от показателя $K_0 = \sigma_3/\sigma_1$, като главните напрежения σ_1 и σ_3 са определени "in situ". При насящото изследване е използвана стойността му, предложена от Seed (1979) $C_1 = 0,63$.

Стойностите на цикличните напрежения, предизвикващи втечняване при експерименталните изпитвания, са с 10% по-високи от естествените. Причина за това е пространственият характер на сеизмичното въздействие, в сравнение с еднопосочното въздействие при експерименталните изследвания. Отчитането на пространствения характер на сеизмичното въздействие, при определяне опасността от втечняване, се извършва чрез намаляване на експерименталните резултати с 10%:

$$(\tau_h/\sigma_v')_{\text{действ.}} = 0,9 \cdot (\tau_h/\sigma_v')_{\text{просто срязване}} = C_1 \cdot (\sigma_{dc}/2\sigma_3')_{\text{триакс. срязване}}$$

Резултатите от динамичните триаксиални изследвания се влияят от множество фактори. Те могат да бъдат обединени в две групи:

- Фактори, свързани с възможностите на използваната апаратура – система за подаване на натоварването (пневматична или електрохидравлична), критерии за изравняване, тип на връзките на натоварващата ос, системите за контрол на напреженията, на порния натиск, на обемните деформации, на степента на водонасищане;
- Фактори, свързани с процедурата на изпитване - подготовката на образците за изследване, приложените странични напрежения, формата и характера на цикличното натоварване, честотата на цикличния товар, размерите на изследвания образец.

Изследванията на Seed (1976) показват, че за някои от тях (например подготовката на образците), влиянието е толкова силно, че разликите в получените резултати могат да достигнат 100%.

Определяне на динамичната якост на хвоста

Лабораторното определяне на условията за втечняване на пясъчни образци е извършено чрез циклични триаксиални изследвания (cyclic triaxial compression test). Експерименталните изследвания са извършени върху интегрална проба от хвоста, която е характерна за състава на материала от стената на хвостохранилището. Зърнометричният състав на изследваната проба е посочен на зърнометричната крива (фиг. 3). Изследванията са проведени за две плътностни състояния на материала – $\rho_d = 1,55$ g/cm³ и 1,65 g/cm³. Тези две плътности са характерни за зоната над кота 782, която, според резултатите от анализа на опасността от втечняване от

полевите динамични пенетрационни изследвания, е с вероятност за втечняване. В дълбочина плътността на хвоста се повишава и практически не съществува опасност от втечняването му под кота 782.

Динамичната якост на водонаситения хвост е изследвана в триаксиален апарат DCM-275 на фирмата "Seiken", Япония. Динамичният девиатор σ_{dp} е приложен по надлъжната ос на образеца. Образците са с размери 10 cm височина и 5 cm диаметър. Цикличното натоварване е синусоидално, с честота 2 Hz. То е приложено след изотропна консолидация, при всестранно ефективно напрежение $\sigma_1 = \sigma_3 = 300$ kPa и при затворена дренажна система (консолидирано-недренирано изпитване). Приложената методика е посочена в Константинов, Стойнев (1992), Стойнев, Константинов (1991) и Стойнев и др. (2003).

Изследването включва следните основни етапи:

- подготовка на образеца - състои в изграждане на образец с предварително зададена плътност. За целта е използван т.н. "метод на утаяването", предложен от Ishihara, Ansal (1982) и конкретизиран от Ansal (1984).
- водонасищане на образеца - то е извършено при хидростатично натоварване $\sigma_3 = 300$ kPa. Хидростатичното натоварване се увеличава от 0 kN/m² до посочетана стойност на степени от 50 kN/m², като паралелно в образеца се създава обратно налягане с големина 0.90-0.95 от хидростатичното. След достигане на зададеното σ_3 , е изчакано пълно водонасищане. Необходимият градиент се задава така, че да надвишава началния градиент на филтрация на материала, като същевременно не се предизвиква сифузионно изнасяне на финозърнестата фракция. Критериите за пълно водонасищане са два - задържане на постоянна стойност на порния натиск след затваряне на дренажната система, или метод "B-check" на Bishop (Bishop, 1962). Образецът се счита за водонаситен, ако при увеличаване на налягането в камерата със 100 kPa, обратното налягане в образеца (back pressure) се увеличи най-малко с 95 kPa.
- консолидация - напълно водонаситените образци консолидират при разлика между хидростатичното налягане и обратното налягане в образеца (изотропна консолидация), равна на геоложкия товар. Тя се постига чрез стъпаловидно увеличаване на хидростатичното налягане през 50 kN/m². Критериите за край на филтрационната консолидация са прекратяването на вертикалните деформации (<0.001 mm/ 10 min) и запазване на нулева стойност на порния натиск след затваряне на дренажната система (<10 Pa/10 min).
- циклично натоварване - прилага се след приключване на филтрационната консолидация и затваряне на дренажната система (консолидирано-недренирано изпитване). То е знакопроменливо, с единична амплитуда σ_{dp} по

направление на оста на образеца. Проведените изследвания са при честота 2 Hz. В процеса на циклично натоварване е извършвана перманентна регистрация на σ_{dp} , на двойната аксиална деформация DA и на порния натиск U в образеца. След N брой колебания настъпва т.н. "начално втечняване" на образеца. Критерият за начално втечняване е достигане на порния натиск U в образеца до първоначално ефективно странично напрежение или достигане на DA до 10 %. За получаване на статистически значими резултати са направени изследвания върху паралелни образци при 6-7 стойности на σ_{dp} , които са подбрани така, че втечняване да настъпи при стойности на N от 3-4 до 6000 цикъла.

Таблица 2.

Физикомеханични свойства на изследваната проба от хвоста и резултати от динамичните триаксиални изпитванията

А. Физични показатели.

№	Показател	Означение	Стойност
1	Специфична плътност	$\rho_s, \text{g/cm}^3$	2,70
2	Максимална обемна плътност на скелета	$\rho_{dmax}, \text{g/cm}^3$	1,69
3	Минимална обемна плътност на скелета	$\rho_{dmin}, \text{g/cm}^3$	1,41
4	Водно съдържание	$W_n, \%$	18,5
5	Зърнометричен състав	Пясък, %	90
		Прах, %	10
		Глина, %	0
6	Обемна плътност на скелета	$\rho_d, \text{g/cm}^3$	1,55÷1,65

Б. Зависимост $\sigma_{dp} / 2\sigma_3^i = f(N)$.

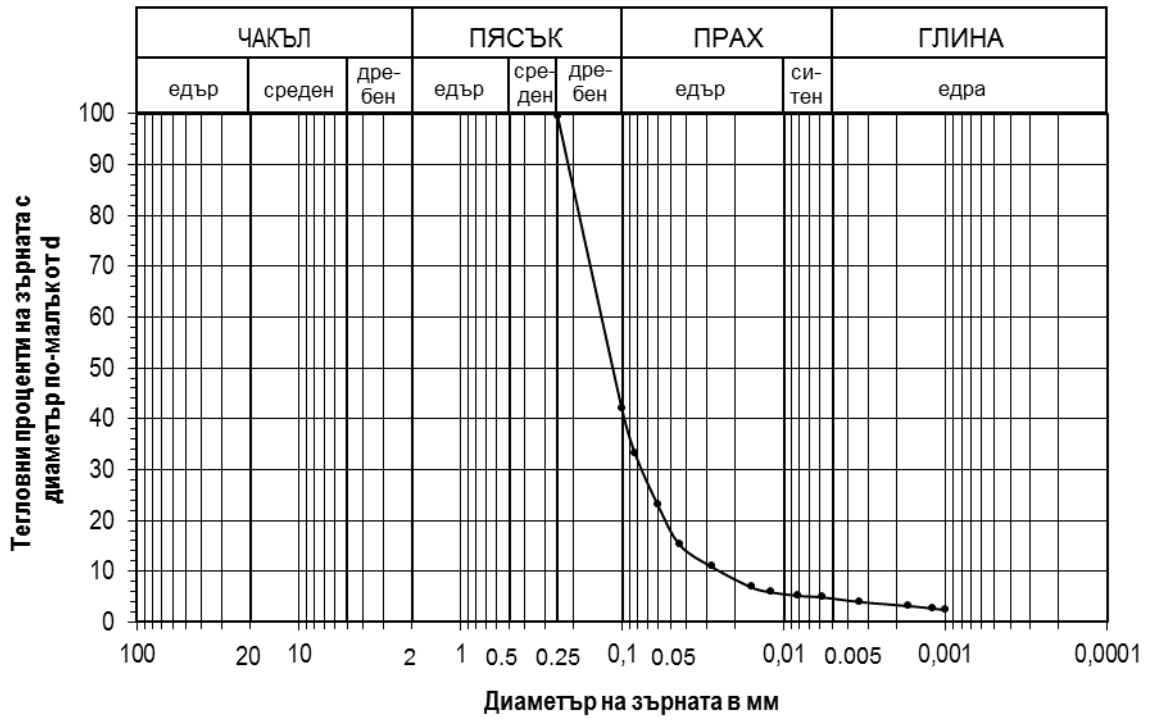
$\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$		$\rho_d = 1,65 \text{ g/cm}^3$	
N	$\sigma_{dp} / 2\sigma_3^i$	N	$\sigma_{dp} / 2\sigma_3^i$
7	0,234	5	0,278
16	0,195	6	0,265
37	0,171	10	0,24
64	0,159	24	0,215
448	0,149	120	0,188
2583	0,142	538	0,18
-	-	4980	0,17

Честота на натоварване - 2 Hz;

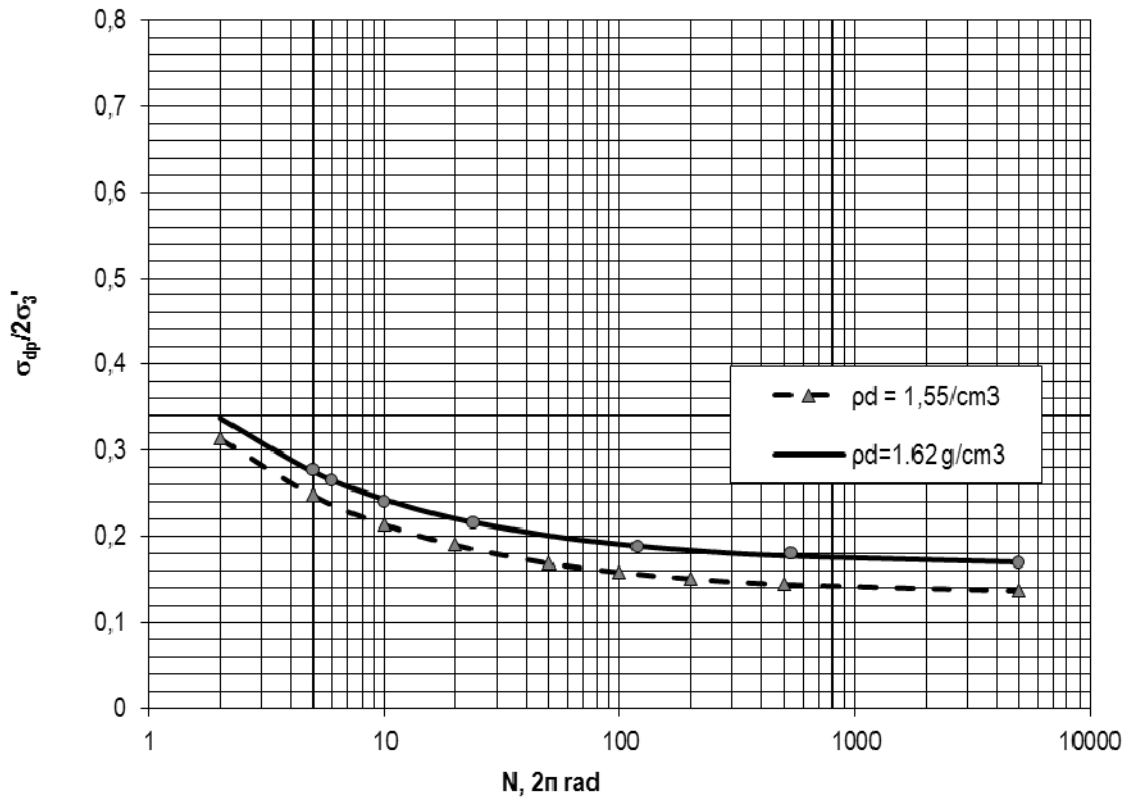
N – брой цикли за начално втечняване;

$\sigma_{dp} / 2\sigma_3^i$ – коефициент на цикличните напрежения.

Резултатите от изследването се отразяват в координатна система $R_L = \sigma_{dp} / 2\sigma_3^i = f(\lg N)$. Плавната крива, съединяваща отделните точки, за които е изпълнено условието $I_D = \text{const}$, се нарича паспорт на динамична якост и изразява граничното напрегнато състояние.



фиг. 3. Зърнометричен състав на изследвания хвост.



Фиг. 4. Зависимост между коефициента на цикличните напрежения $\sigma_{dp}/2\sigma_3'$ и броя на колебанията N за хвост с обемни плътности на скелета $\rho_d=1,55 \text{ g/cm}^3$ и $\rho_d=1,62 \text{ g/cm}^3$

Зависимостта $R_L = f(\lg N)$ се описва с уравнение на съставна хипербола от вида:

$$R_L = R_{L,\infty} + A \cdot N^{-b},$$

където:

$R_{L,\infty}$ - съпротивление при неограничен (безкраен) брой колебания; A и b са емпирични коефициенти, зависещи от състава и състоянието на хвоста.

Граничните условия, които се определят от асимптотата на хиперболата, имат определен физически смисъл: когато N клони към 0 то съпротивлението срещу втечняване клони към безкрайност, и обратно, при достатъчно голям брой колебания (N клони към безкрайност), съпротивлението срещу втечняване остава практически постоянна величина. Определянето на параметрите на уравнението еднозначно определя $R_{L,\infty}$. Числено тя се изразява чрез онзи коефициент на цикличните напрежения, който не предизвиква втечняване на хвоста, тоест от вертикалната координата на асимптотата на уравнението.

Резултатите от проведените изследвания при двете плътностни състояния са посочени на таблица 2 и фигура 4.

Определената динамична якост на хвоста при двете плътностни състояния дава възможност да се извърши анализ на опасността от втечняване, чрез използване на аналитичните методи и въз основа на разчетните характеристики, получени от сеизмичното райониране на площадката.

Литература

- Константинов, Б., С. Стойнев. Протичане на водонаситени пясъци (експеримент и прогноза). - *Строителство*, 3-4, 1992. - 24-27
- Стойнев, С., Б. Константинов. Динамична (сеизмична) устойчивост на водонаситени пясъци. - *Год. на МГУ*, 37, 3, 1991. - 79-86.
- Стойнев, С., Б. Константинов, А. Лаков. Върху естествената структура на водонаситени прахови пясъци. Иновации в маркшайдерството и геотехниката, Сб. Доклади от X Юбилейна Национална маркшайдерска конференция, Варна, 2003.
- Стойнев, С. (ред.). Детайлно микросеизмично райониране и определяне на проектните сеизмични характеристики на хвостохранилище „Люляковица“. Доклад на „МГУ Инженеринг“, Фонд „Асарел“ АД, 2014.
- Alarcon-Guzman, A., G. Leonards, J. Chameau. Undrained monotonic and cyclic strength of sands. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 10, 1988. - 1089-1109.
- Ansal, A. Final Report for Task Group on Standardization of Dynamic Testing Pressures for UNDP/UNESCO. Project on Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, Turkish

- National Committee on Earthquake Engineering, Istanbul, 1984. - 32.
- Bishop, Alan W. Measurement of soil properties in the triaxial test. London : E. Arnold, 1962,
- Brandon, T., G. Clough, P. Rahardjo. Fabrication of Silty Sand Specimens for Large and Small scale Tests. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.14, No 1, 1991. - 46- 55.
- Hird, C., F. Hassona. Some factors affecting the liquefaction and flow of saturated sands in laboratory tests. *Engineering Geology*, vol. 28, No.1—2, 1990. - 149-170.
- Hyodo, M., H. Tanimizu, N. Yasufuku, H. Murata. Undrained cyclic and monotonic triaxial behavior of saturated loose sand. *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, 1994. - 19-32.
- Ishihara, K. Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, Vol. 43, No. 3, 1993.. - 351-415.
- Ishihara, K., A Ansal. Dynamic Behavior of Soils, Soil Amplification, and Soil Structure Interaction. Final Report for WED, UNESCO Report for the Project on Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, UNESCO, Paris, Vol.4 1982. - 125.
- Seed, H. Some Aspects Of sand Liquefaction under Cyclic Loading. *Proceedings, Conference on Behavior of Offshore Structures, Norway*, 1976.
- Seed, H.B., “Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 105, No. GT2, 1979, p. 201-255.
- Seed, H., W. Peacock. Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics. *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, Vol. 97 SM8, 1971.
- Seed, H., R. Sukhmander, C. Chan, P. Vilela. Considerations in Undisturbed Sampling of Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Feb. 1982, GT2, 1982. - 265- 282.
- Seed, H., H. Anwar. Development Of a Laboratory Technique for Correcting Results of Undrained Triaxial Shear Tests on Soil Containing Coarse Particles for Effects of Membrane Compliance. *Research Report No. SU/GT/86-02*, Stanford University, 1986.
- Tatsuoka, F., M. Silver. Undrained stress- strain Behavior of Sand under irregular loading. *Soil and Foundation*, Vol.21, No.1 1981. - 51-66.
- Tatsuoka, F., K. Ochi, S. Fujii, M. Okamoto. Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sands for Different Sample Preparation Methods. *Soil and Foundation*, Vol.26, No 3, 1986. - 23-41.

Статията е рецензирана от доц. д-р Николай Стоянов и препоръчана за отпечатване от кат. „Хидрогеология и инженерна геология“.