



## ЛАБОРАТОРНИ МЕТОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДИНАМИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА ХВОСТ ЗА ЦЕЛИТЕ НА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКВИВАЛЕНТЕН ЛИНЕЕН АНАЛИЗ

Николай Милев<sup>1</sup> и Джунички Косеки<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, България, milev\_fte@uacg.bg

<sup>2</sup> Геотехническа лаборатория, Токийски университет, 7-3-1 Хонго, Бункьо-ку, 113-8656 Токио, Япония, koseki@civil.t.u-tokyo.ac.jp

### РЕЗЮМЕ

Докладът е фокусиран върху изследването на материал от хвостохранилище „Люляковица“, което се намира в близост до град Панагюрище – България. Целта на разработката е да разгледа някои лабораторни подходи за определяне на ключови динамични параметри на изследвания материал с оглед последващо даване на оценка относно сеизмичното реагиране на съществуващото хвостохранилище. За провеждането на еквивалентен линеен анализ, който е широко разпространен в земетръсното геотехническо инженерство, от съществено значение са няколко основни зависимости и параметъра, а именно: деградацията на коравината на материала в зависимост от ъгловите деформации, коефициента на затихване и коравината при малки деформации – изразена чрез скорост на разпространение на срязващи вълни. В доклада са разгледани три експеримента, проведени в геотехническа лаборатория „Комаба“ на Токийския университет, които представляват недренирани циклични триосови изпитвания. Опитите са проведени за една и съща стойност на относителната плътност на хвоста (95%), но при различни стойности на ефективния всестранен натиск, съответно за 50 kPa, 80 kPa и 100 kPa. Като допълнение са приложени два независими един от друг динамична метода за измерване на скоростта на разпространение на срязващи вълни в образците. Резултатите показват съвпадение с някои приблизителни и добре известни в литературата насоки за индиректно дефиниране на динамичните показатели на материала, като същевременно демонстрират целесъобразността на възприетите лабораторни опити за получаване на пълен набор от зависимости и параметри, необходими за последващ сеизмичен анализ на съоръжението (хвостохранилище „Люляковица“).

**Ключови думи:** еквивалентен линеен анализ, недрениран цикличен триосов опит, бендер-елементи, скорост на разпространение на срязващи вълни, деградация на коравина, коефициент на затихване, земетръс, сеизмично геотехническо инженерство, геотехника

## LABORATORY METHODS FOR DETERMINING DYNAMIC PROPERTIES OF MINE TAILINGS FOR THE SAKE OF PERFORMING EQUIVALENT LINEAR ANALYSIS

Nikolay Milev<sup>1</sup> and Junichi Koseki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo Simirnenki Blvd., Sofia 1164, Bulgaria; milev\_fte@uacg.bg

<sup>2</sup> Geotechnical Engineering Laboratory, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, 113-8656 Tokyo, Japan, koseki@civil.t.u-tokyo.ac.jp

### ABSTRACT

This paper is focused on the study of a material from Lyulyakovitsa tailing dam which is located in Panagurishte – Bulgaria. The aim of the presented research is to introduce some laboratory approaches for



determining key dynamic parameters of the examined material for the sake of subsequent assessment of the seismic response of the existing tailing dam. In order to perform an equivalent linear analysis, which is widely adopted in earthquake geotechnical engineering practice, a few basic parameters and relations are of crucial importance as follows: stiffness degradation of the material in relation to shear strains, damping ratio and small-strain stiffness – represented by shear wave velocity. Three experiments are presented in this paper – all of them have been performed at the geotechnical laboratory Komaba of the University of Tokyo and suggest undrained cyclic triaxial tests. They have been performed at the same relative density of 95% at various effective confining stress – 50 kPa, 80 kPa and 100 kPa, respectively. Additionally, two dynamic methods, which are independent from each other, have been applied for measuring shear wave velocity in the specimens. Results indicate good match with some approximate and well-established guidelines from the literature which indirectly define dynamic parameters of the material. Moreover, outcome from the study demonstrates the suitability of the adopted laboratory tests for obtaining a full set of relations and parameters which are needed for subsequent seismic analysis of the Lyulyakovitsa tailings dam.

**Key words:** equivalent linear analysis, undrained cyclic triaxial test, bender-elements, shear wave velocity, stiffness degradation, damping ration, earthquake, seismic geotechnical engineering, geotechnics

## ВЪВЕДЕНИЕ

Докладът разглежда динамичното изследване на материал от хвостохранилище „Люляковица“ (намиращо се в близост до град Панагюрище) чрез съвременни лабораторни методи – [2]. Фокус на представените изследвания е дефинирането на ключови динамични параметри на изследвания хвост с оглед последващо даване на оценка относно сеизмичното реагиране на съществуващото хвостохранилище.

Еквивалентният линеен анализ е често използван метод в сеизмичното геотехническо инженерство за оценка на реагирането на земната основа и фундаментните конструкции по време на земетръс – [5] и [8]. Това е опростен подход, който запълва празнината между два други метода, единият опростен, другият – по-сложен, а именно – линейно еластичен анализ и нелинеен анализ (например по МКЕ). По време на сеизмично въздействие почвата трепти и в нея се генерират срязващи напрежения, съответно и ъглови деформации. При традиционния линеен еластичен анализ се приема, че почвата остава в рамките на еластичния диапазон и проявява линейна зависимост между напрежения и деформации. В действителност обаче почвите могат да реагират изявено нелинейно при големи срязващи напрежения, предизвикани от сеизмичните вълни. За да се преодолеят недостатъците на линейния еластичен анализ и да се избегне сложността на нелинейния анализ (например по метод на крайните елементи), в практиката често се възприема еквивалентен линеен анализ. Основната идея зад него е да бъдат модифицирани материалните (механичните) параметри на почвата по начин, който гарантира, че реагирането на земната основа в анализа се доближава до реалното поведение на почвата. Еквивалентният линеен анализ е базиран на някои базови физични и механични параметри на материала, както и следните динамични зависимости: деградацията на коравината на материала в зависимост от ъгловите деформации, коефициента на затихване и коравината при малки деформации – изразена чрез скорост на разпространение на срязващи вълни. Акцентът на доклада е определянето именно на тях в лабораторни условия.

## ОПИСАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИТЕ ОПИТИ

Всички лабораторни експериментални изследвания са проведени в Лаборатория за геотехнически изследвания в кампус „Комаба“ към Токийски университет (Япония). Получени са базови физични параметри на изследвания хвостов материал чрез конвенционални тестове, а чрез усъвършенстван апарат за триосово срязване е оформена богата палитра от механични негови характеристики.

Хвостовият материал, който е изследван, е несвързан и изпитан в консолидирано недренирано водонаситено състояние. В Табл. 1 е показано обобщение на проведените експерименти.



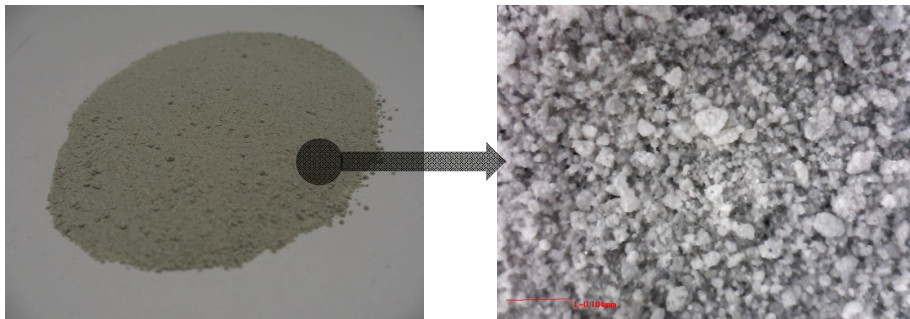
Табл. 1 Обобщение на проведените експерименти

Проведени експерименти					
Тест №	Тип опит	Материал	$\sigma'_c$ [kPa]	$D_r$ [%]	Брой фази
Test 121	$E/E_{max}$ - $\gamma$ , $G/G_{max}$ - $\gamma$ и	Хвостохранилище "Люляковица"	100	95	9
Test 122	$\xi$ - $\gamma$ зависимости		50	95	8
Test 123	(недрениран цикличен)		80	95	9

## ИЗСЛЕДВАН МАТЕРИАЛ

Изследваният материал е несвързан и взет от хвостохранилище „Люляковица“ – Фиг. 1. Хвостохранилището е изградено в чашата на кариера „Люляковица“ и се намира на 8 км северозападно от гр. Панагюрище, в близост до река „Банска луда Яна“. То представлява намивно земно-насипно съоръжение (утайник) за съхранение на отпадъчен шлам от набогатяването на руда, който е във вид на пулп от Обогатителната фабрика на „Асарел-Медет“ АД. Насипването на отпадъка става чрез разсредоточено изпускане на хвост от разделителни хвостопроводи и хидроциклони. Стената на хвостохранилището се надгражда чрез хидроотвали, образувани по намивен способ или диги за задържане на отпадъка, които са изградени от утаяване на самия хвост, като водите се филтрират в основата на стената и се връщат в обогатителната фабрика за повторно използване.

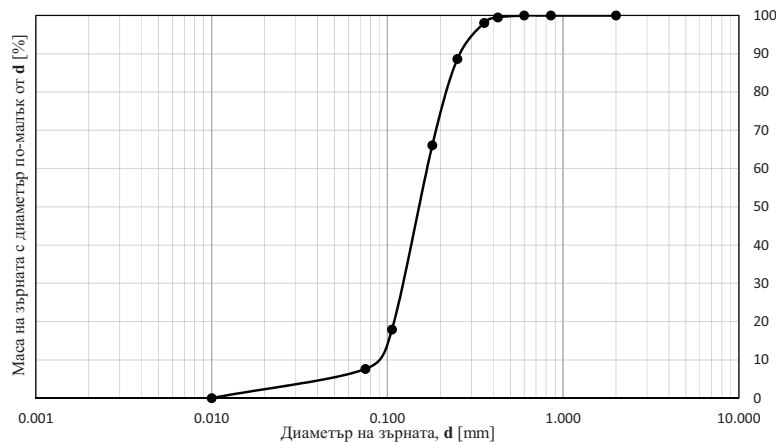
Чрез цикличен триосов апарат са изпитани общо три нарушени проби от хвостохранилище „Люляковица“, като в лабораторни условия е възпроизведено водонаситеното им състояние с относителна плътност, която те притежават на дълбочина 12÷33 m под повърхността. Физико-механичните параметри и зърнометрична крива на хвоста са представени съответно в Табл. 2 и Фиг. 2.



Фиг. 1. Изследван материал – хвост от хвостохранилище „Люляковица“

Табл. 2. Физични и механични характеристики на материал от хвостохранилище „Люляковица“

Спец. плътност	Обемна плътност на скелета	Коеф. на порите	Макс. коеф. на порите	Мин. коеф. на порите	Относ. плътност	Среден диаметър на зърната	Частици по-малки от 75 $\mu$ m	Коеф. на разнозърн.	Ъгъл на вътрешно триене
$\rho_s$	$\rho_d$	$e$	$e_{max}$	$e_{min}$	$D_r$	$D_{50}$	$F_C$	$C_U$	$\phi$
[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[%]	[mm]	[%]	[-]	[°]
2.73	1.79	0.527	1.200	0.501	96	0.17	7.62	1.89	22.00



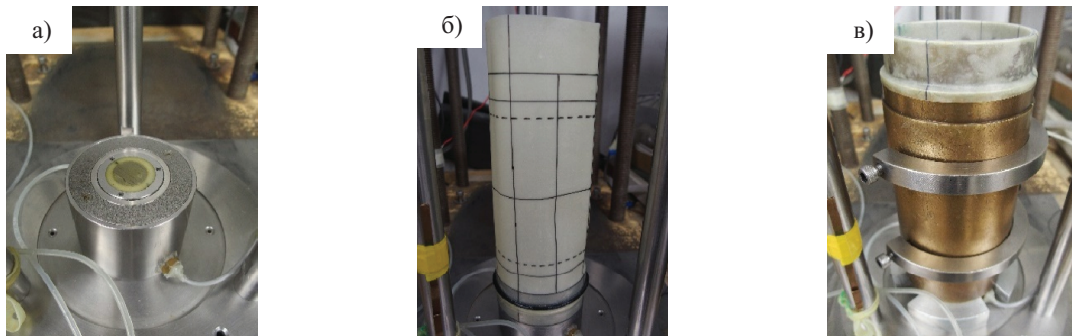
Фиг. 2. Зърнометрична крива на хвоста



## ПОДГОТОВКА НА ОБРАЗЦИ

Хвостовите образци са подготвени при спазване на следната последователност на действията:

- 1) Латексова мембрана с дебелина 0.3 mm се нахлузва върху долния пиедестал на апарата, който е снабден с порьозна плочка (Фиг. 3а). Мембраната е разграфена предварително и са отбелязани точките, в които впоследствие са закрепени датчиците. След това тя се прилепва надеждно за пиедестала чрез силикон и се фиксира с ластик и гумен пръстен (Фиг. 3б);
- 2) Долният пиедестал и мембраната се ображдат плътно от метална форма, съставена от 2 части, която спомага за оформянето на почвения образец в цилиндрична форма. Двете части се затягат една към друга с метална скоба, а зоната на контакт между тях се намазва със специален изолиращ грес;
- 3) Горният край на мембраната се загръща върху металния цилиндър – Фиг. 3в;
- 4) Прилага се негативно налягане от -30 kPa така, че мембраната да прилепне плътно за металния пръстен;



Фиг. 3. а) Подготовка на долен пиедестал; б) Поставяне на мембрана върху долен пиедестал; в) Нахлузване на мембраната върху метална форма за оформяне на почвения образец



Фигура 4. Подготовка на образците по метод „ мокро трамбоване“

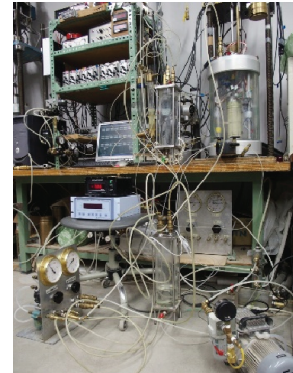
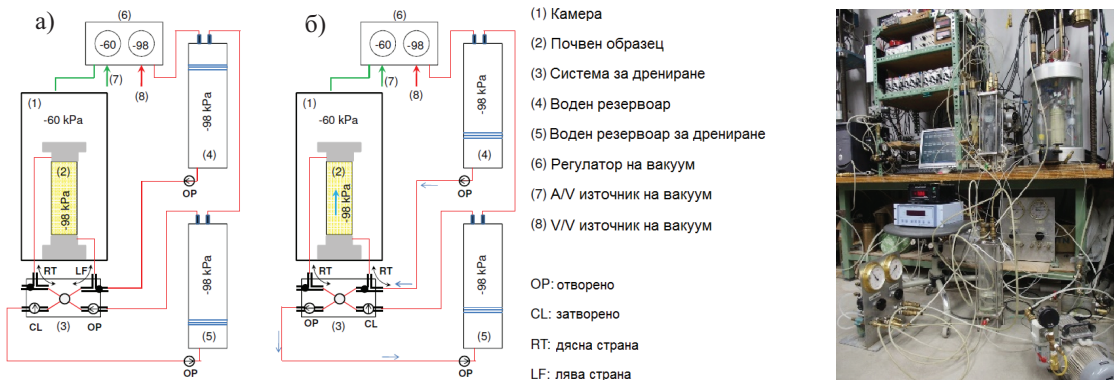
- 5) Почвеният материал се вгражда по способ „ мокро трамбоване“ (Фиг. 4):
  - Материалът се смесва с такова количество вода, с което да бъде постигнато оптималното водно съдържание ( $w_{opt} = 12.4\%$ );
  - Сместа се разбърква с миксер;
  - Материалът се разпределя на пет части в херметически затворени пликчета;
  - Така полученият материал се изсипва през хартиена фуния на 5 пласта с еднаква височина от по 30 mm, като всеки пласт се трамбова с метален прът преди да се изсипе следващият;
  - С остър предмет се нарушава гладката повърхност, получена при трамбоването, с цел да се осигури добър контакт между отделните пластове, а от там и хомогенен почвен образец.
- 6) Горният печат се спуска внимателно до контакт с горната равнина на почвения образец, а след това буталото за натоварване се „заклучва“, за да не се поврежда пробата;
- 7) Горният край на мембраната се нахлузва върху горния печат, като се прилепва със силикон и се фиксира с ластик;



8) Негативното налягане се прехвърля да действа върху образеца чрез долния пиедестал и горния печат, а металния цилиндър се премахва;

9) Инсталира се контратежест върху буталото за натоварване и то се отключва. Осигурява се баланс, за да не бъде образецът нито опънат, нито натиснат. Това се следи чрез вътрешната клетка за натоварване, която се включва към усилвател. Буталото отново се „заключва“, а контратежестта се премахва;

10) За образеца се закачат бендер-елементи и акселерометри – системи за измерване на скорост на разпространение на срязващи вълни – [7];



Фиг. 5. Водонасищане на почвени образци по метод с двоен вакуум: а) преди водонасищане – при премахване на въздуха от порите; б) в процес на водонасищане с деаерирана дестилирана вода

11) Поставя се камерата на триосовия апарат и се закрепва с 3 болта, като след това се пълни с около 3 литра вода. Контратежестта се инсталира отново, буталото за натоварване се отключва и се осигурява баланс в образеца така, че да няма опън или натиск в него;

12) На стъпки от по 5 kPa се достига до положителен всестранен натиск от +30 kPa в камерата, като на всяка стъпка негативното налягане в образеца (първоначално -30 kPa) се намалява също с по 5 kPa. След последната стъпка напрежението в образеца е 0 kPa. През цялото време се следи образецът да не е опънат или натиснат чрез добавяне или премахване на контратежести;

13) Пробата се водонасища по „метод с двоен вакуум“ – прилага се пълен вакуум (-98 kPa) в образеца („back pressure“) при константно ефективно напрежение от 38 kPa, което се постига чрез прилагане на вакуум от -60 kPa в камерата на апарата. Това състояние се поддържа в продължение на 3 часа. След това, деаерирана дестилирана вода се пуска да навлиза в пробата от долната ѝ страна, като същевременно се прилага пълен вакуум (-98 kPa) в двата използвани водни резервоара – водонасищач и дрениращ образеца. Процедурата е демонстрирана на Фиг. 5 – [1];

14) Диференциалният датчик с висок капацитет за измерване на напрежение (HCDPT) и диференциалният датчик с нисък капацитет за измерване на напрежение (LCDPT) се настройват чрез пускане на дестилирана вода през тях докато спрат да се появяват мехурчетата в нея. След това HCDPT и LCDPT се свързват с усилватели и с триосовия апарат;

15) На стъпки от по 10 kPa и в дренирано състояние, паралелно започва да се увеличава напрежението в камерата и това в почвения образец („back-pressure“) до достигане съответно на 230 kPa и 200 kPa (ефективен всестранен натиск от 30 kPa). През цялото време се внимава образецът да не е опънат или натиснат чрез добавяне или премахване на контратежести;

16) Проверява се дали пробата е водонаситена чрез измерване на  $B$ -стойност на Скемптън – [6];

17) Буталото за натоварване се фиксира (заключва), а контратежестта се премахва. Апаратът се мести под системата за натоварване (A/C мотор и зъбни колела), а буталото се закача за нея;

18) Поставя се външен датчик за измерване на деформациите (EDT), който се свързва с усилвател. Той измерва преместването на хоризонтална метална плочка, прикрепена за буталото за натоварване;

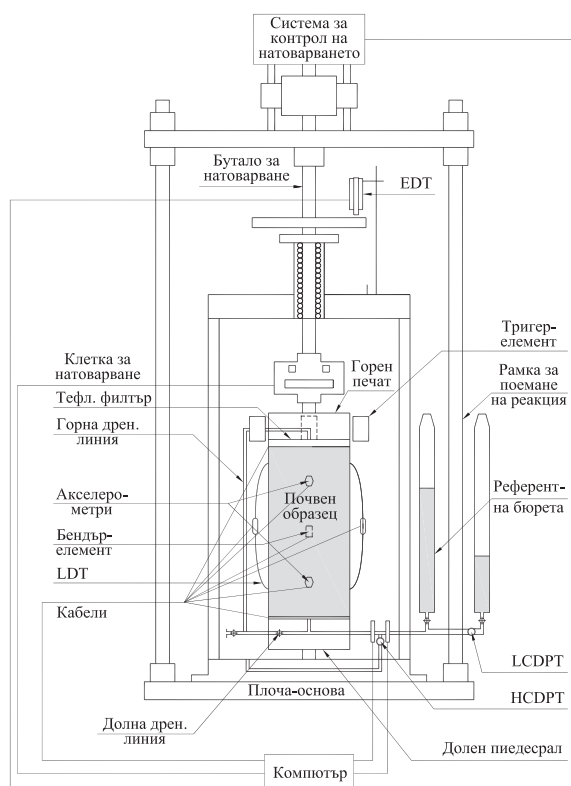
19) Компютърът се настройва за автоматизирано провеждане на експеримента.

## ТРИОСОВ АПАРАТ „КОМАБА“

За провеждане на експериментите е използван апарат за триосово срязване с контрол на деформациите, задвижван от система от зъбни колела – Фиг. 6. Системата за осово натоварване се състои от АС-сервомотор, електромагнитен амбреаж и спирачка. Преместването на буталото за натоварване прецизно се контролира от системата за натоварване. Експериментите са проведени с изключително прецизен контрол на напреженията и деформациите, продиктуван от затворена система с обратна връзка. Използвани са аналогови към дигитални и дигитални към аналогови преобразуватели за управление на затворената система с обратна връзка, която контролира тестовете. Измерваните от уреда параметри се преобразуват чрез аналогов цифров конвертор (А/D), като по този начин експериментите могат да бъдат контролирани изцяло от компютър.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОЦЕДУРА

В триосовия апарат, използван в представеното изследване, в системата за натоварване е вграден променливотоков серво-мотор по начин, който позволява циклите на натоварване-разтоварване (циклично натоварване) с контрол на напрежението, да могат да бъдат приложени прецизно в образца (във вертикална посока).



Фиг. 6. Усъвършенстван апарат за триосово срязване тип „Комаба“

Пълните напрежения, действащи върху почвения образец в процеса на провеждане на опити с апарат за триосово срязване, както и съответните деформации, се дефинират както следва (Фиг. 7):

$\sigma_3 = \sigma_c$  – радиално напрежение (всестранен натиск в камерата) – минимално главно нормално напрежение,

$\sigma_1 = \sigma_a = \sigma_c + (F_a / A_{specimen})$  – аксиално (вертикално) напрежение – максимално главно нормално напрежение,



$\varepsilon_3 = \varepsilon_c$  – радиална (хоризонтална) деформация;

$\varepsilon_1 = \varepsilon_a$  – аксиална (осова) деформация;

където:

$F_a$  – аксиална (осова) сила – вертикална,

$A_{specimen}$  – площ на напречното сечение на почвения образец.

$\sigma_{dev} = q = \sigma_1 - \sigma_3$  – девиатор на напреженията,

Съответните ефективни напрежения (с отчитане на порния натиск в почвата) са:

$\sigma_3' = \sigma_c' = \sigma_c - u$  – ефективно радиално напрежение,

$\sigma_1' = \sigma_a' = \sigma_a - u$  – ефективно аксиално напрежение,

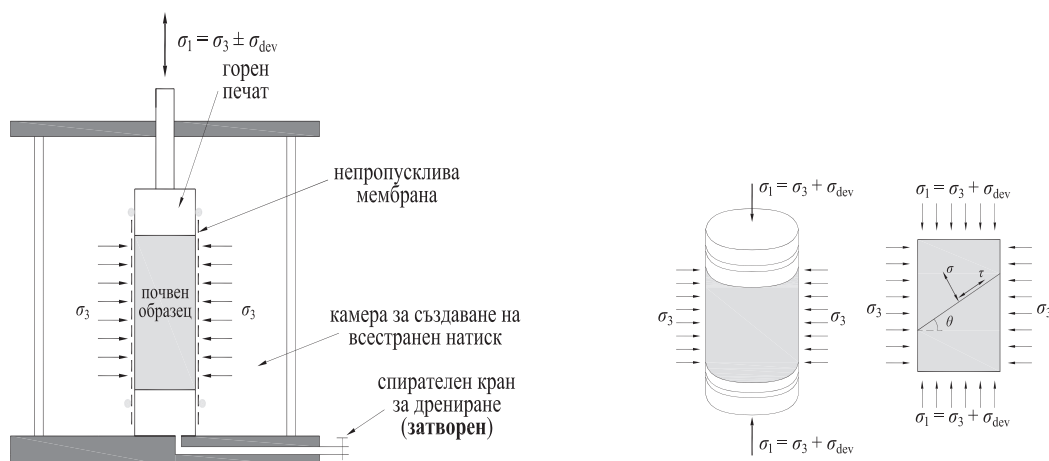
където:

$u$  – порен натиск,

$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} = \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3} = \frac{\sigma_a' + 2\sigma_c'}{3}$  – средно ефективно напрежение,

За да може да бъде измерено вертикалното напрежение,  $\sigma_1$ , непосредствено над горния печат (вътре в камерата) е вградена натискомерна клетка („load cell“) – по този начин се елиминират ефектите от триенето на буталото. Вертикалната деформация,  $\varepsilon_1$ , се измерва посредством външно закачен датчик („external disk transducer“ – EDT). Хоризонталното напрежение,  $\sigma_3$ , е приложено чрез въздуха под налягане в камерата – то е измерено чрез диференциален датчик с висок капацитет за измерване на напрежение („high capacity differential pressure transducer“ – HCDPT).

След подлагане на образците на изотропна консолидация са проведени три опита с циклично натоварване на пробите в недренирани условия с цел определяне деградацията на коравината (чрез  $E-\varepsilon_{a,SA}$  и  $G-\gamma_{a,SA}$  зависимости) и затихването (чрез  $\xi-\gamma_{a,SA}$  зависимости) на хвоста при различен ефективен всестранен натиск,  $\sigma_c'$ , съответно – 50 kPa, 80 kPa и 100 kPa. След достигане на крайната стойност на напрежението за изотропна консолидация (ефективен всестранен натиск в камерата,  $\sigma_c'$ ), посредством два независими метода (метод с бандер-елементи и метод с триггер-елементи и акселерометри) е измерена скорост на разпространение на срязващи вълни в образеца – параметър, който дава директна информация относно коравината на хвоста при малки деформации (начален модул на срязване,  $G_{max}$ ) – [3].

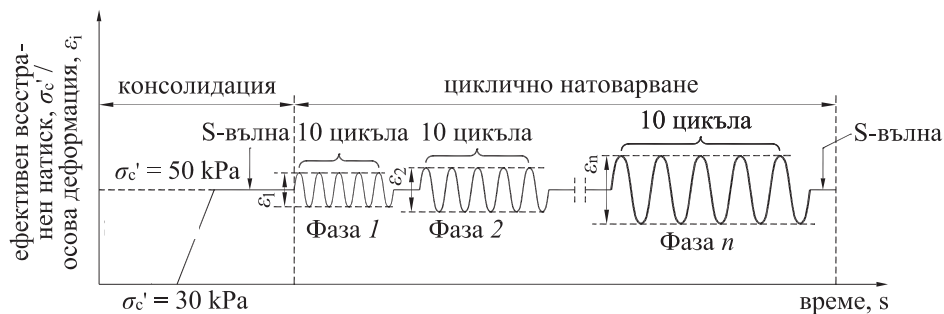


Фиг. 7. Напрежения при изпитване на образци чрез апарат за триосово срязване

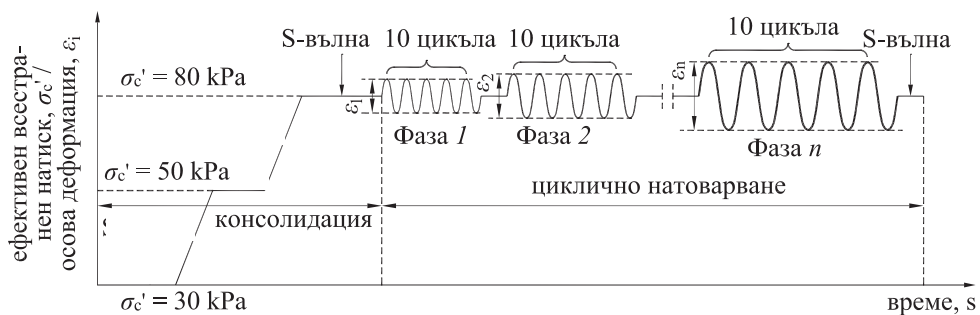
По-съществена особеност на този тип експерименти касае самото натоварване, което не е обвързано с монотонно нарастване на девиатора на напреженията,  $\sigma_{dev}$ , а е циклично и



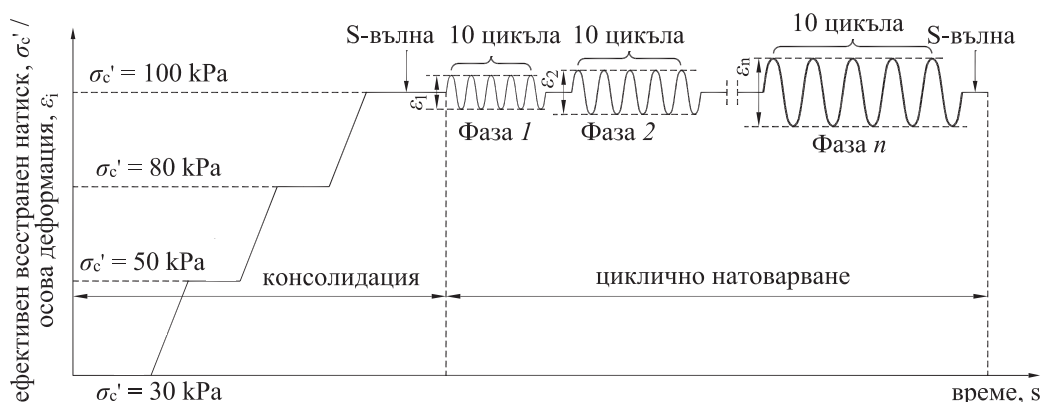
знакопроменливо с константна амплитуда на  $\sigma_{dev}$  (прилага се в недренирани условия във всички опити). Всяка фаза на цикличното натоварване е съставена от по десет цикъла – от Фиг. 8 до Фиг. 10. При първа фаза се генерира относително малка амплитуда на осовите деформации ( $\varepsilon_a \approx 10^{-6}$ ), а при всяка следваща, амплитудата се увеличава. Между всяка фаза ефективното напрежение в пробата се възстановява и образеца се подлага на изотропна консолидация. При констатация на значително нарастване на порния натиск (над 25% от пълното напрежение) по време на цикличното натоварване в недренирани условия, при някоя от фазите с относително големи осови деформации, са проведени по-малък брой цикли (съответно 5, 2 или 1), а експериментът приключва тогава, когато в последната фаза се установи почти пълно изчерпване на ефективното напрежение в структурата на образеца (състояние близко до втечняване, обикновено при осова деформация около  $\varepsilon_a \approx 0.015$ ).



Фиг. 8. Последователност в експерименталната процедура при провеждане на циклични тестове за определяне на деформационни характеристики на почвен материал при  $\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$



Фиг. 9. Последователност в експерименталната процедура при провеждане на циклични тестове за определяне на деформационни характеристики на почвен материал при  $\sigma'_c = 80 \text{ kPa}$



Фиг. 10. Последователност в експерименталната процедура при провеждане на циклични тестове за определяне на деформационни характеристики на почвен материал при  $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$





В метода за изразяване на сеизмичното въздействие чрез циклични деформации, те са ъгливи, а не осови, каквито се генерират при триосовите апарати. В лабораторни условия, при провеждане на циклично знакопроменливо натоварване чрез апарат за триосово срязване, единичната амплитуда на осовата деформация,  $\varepsilon_{a,SA}$ , се преобразува в единична амплитуда на ъгловата деформация,  $\gamma_{SA}$ , чрез коефициента на Поасон на почвата,  $\nu$ , който има теоритична стойност от 0.5 в недренирани условия:

$$\gamma_{SA} = \varepsilon_{a,SA}(1 + \nu) = 1.5\varepsilon_{a,SA}, \quad (1)$$

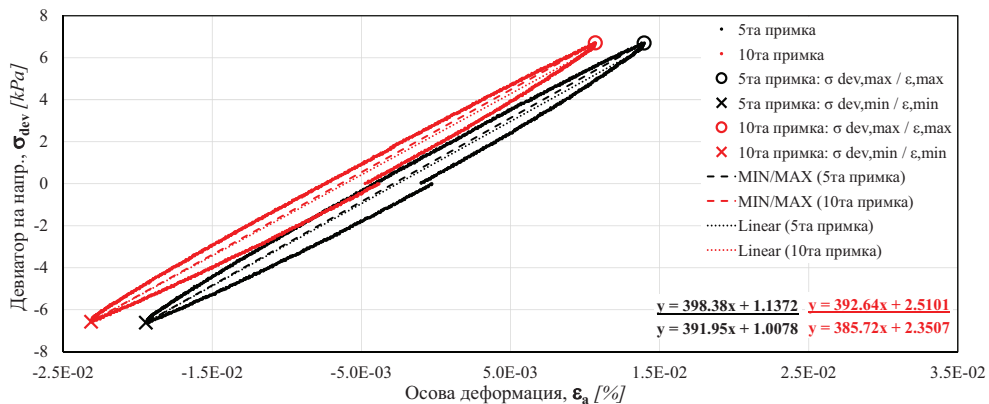
$$\varepsilon_{a,SA} = \frac{0.5(\varepsilon_{a,max} + \varepsilon_{a,min})}{H_{specimen}}, \quad (2)$$

където:

$H_{specimen}$  – височина на почвения образец,

$\varepsilon_{a,max}$  – максимална осова деформация,

$\varepsilon_{a,min}$  – минимална осова деформация.



Фиг. 11. Примерно сравнение между пета и десета хистерезисна примка от проведен цикличен тест

За да бъдат определени деградацията на коравината на почвата ( $E-\varepsilon_{a,SA}$  и  $G-\gamma_{a,SA}$  зависимости) и затихването ( $\xi-\gamma_{a,SA}$  зависимости) е необходимо резултатите от всяка фаза на циклично натоварване да се изразят чрез зависимост „девиатор на напреженията-осова деформация“ ( $\sigma_{dev}-\varepsilon_a$ ) за пети и десети цикъл (пета и десета хистерезисна примка) – Фиг. 11. Този подход е нецелесъобразен при нарастване на порния натиск над 25% от пълното напрежение (тогава се констатира деградация на коравината с всеки следващ цикъл) и в подобни случаи хистерезисните примки са разгледани самостоятелно.

„Динамичният“ деформационен модул при недренирано циклично натоварване за  $i$ -ти цикъл,  $E_{u,cyclic,i}$ , се дефинира както следва (Фиг. 12):

$$E_{u,cyclic,i} = \frac{2\sigma_{dev,i}}{\varepsilon_{a,i}} = \frac{\sigma_{dev,i,max} + \sigma_{dev,i,min}}{\varepsilon_{a,i,max} + \varepsilon_{a,i,min}}, \quad (3)$$

където:

$\sigma_{dev,i,max}$  – максимален девиатор на напреженията за  $i$ -ти цикъл,

$\sigma_{dev,i,min}$  – минимален девиатор на напреженията за  $i$ -ти цикъл,

$\varepsilon_{a,i,max}$  – максимална осова деформация за  $i$ -ти цикъл,

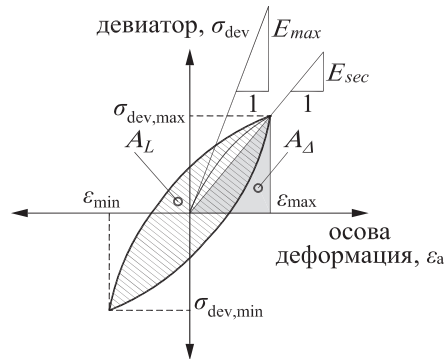
$\varepsilon_{a,i,min}$  – минимална осова деформация за  $i$ -ти цикъл.

За определяне на окончателния „динамичен“ деформационен модул при недренирано циклично натоварване,  $E_{u,cyclic}$ , е взета средноаритметичната стойност на  $E_{u,cyclic,5}$  и  $E_{u,cyclic,10}$ :

$$E_{u,cyclic} = \frac{E_{u,cyclic,5} + E_{u,cyclic,10}}{2}, \quad (4)$$

При известно  $E_{u,cyclic}$  и възприемане на стойност от 0.5 за коефициента на Поасон в недренирани условия,  $\nu = 0.5$ , следва:

$$G_u = G' = \frac{E_{u,cyclic}}{2(1+\nu)} = \frac{E_{u,cyclic}}{3}, \quad (5)$$



Фиг. 12. Характерни точки и зони на типична хистерезисна примка

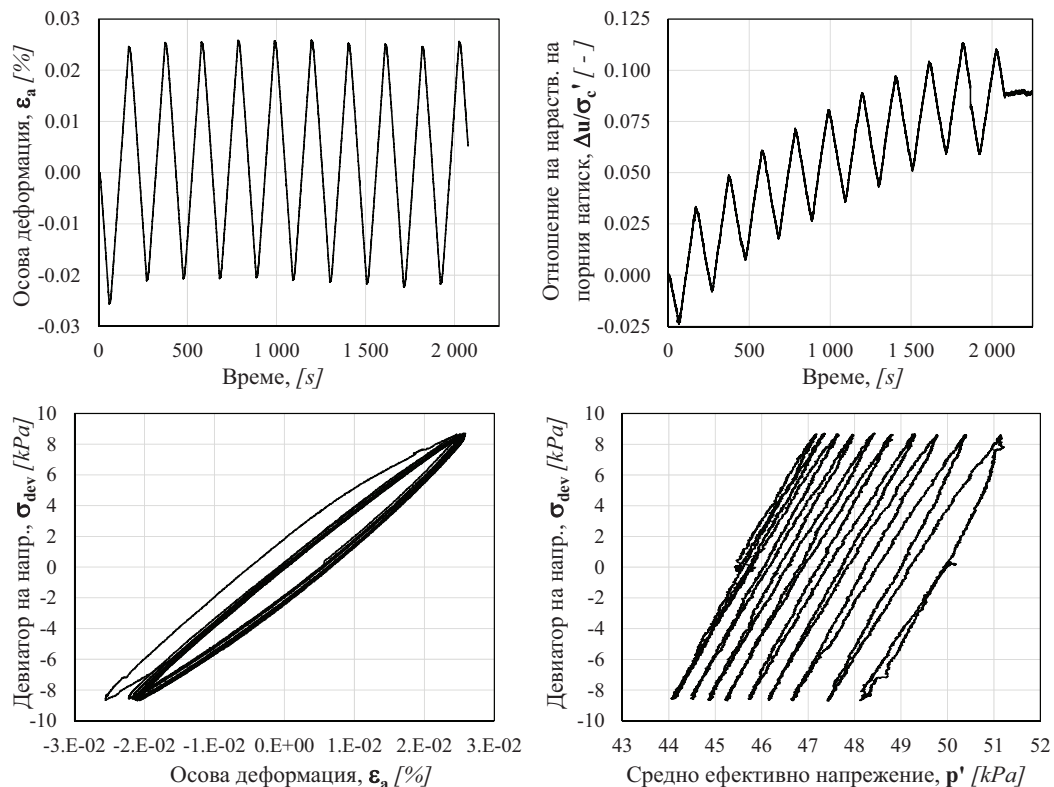
Коефициентът на затихване на хвоста,  $\xi$ , е индикация за дисипираната енергия в материала. Той се представя чрез уравнението:

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_\Delta}, \quad (6)$$

където:

$A_L$  – площ на хистерезисната примка, представляваща дисипираната от почвата енергия в процеса на нейната деформация и критерий за вътрешното затихване в почвения масив,

$A_\Delta$  – площ на триъгълника от Фиг. 12, представляващ съхранената енергия при максимална осова деформация.



Фиг. 13. Типичен запис на фаза (десет цикъла с един и същ девиатор на напрежията) циклично натоварване



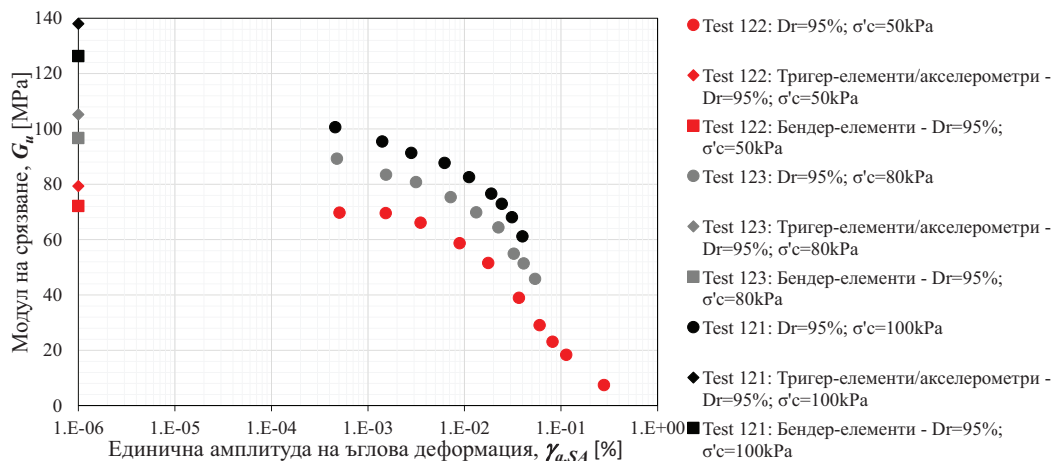
Типичен запис на пълна фаза от проведен опит с циклично натоварване в триосов апарат е представен на Фиг. 13.

## РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

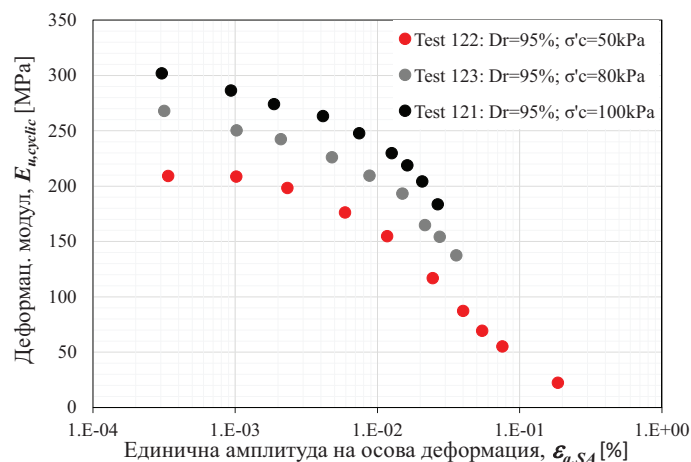
Резултати, свързани с промяната на модула на срязване във функция на ъгловите деформации са обобщени на Фиг. 14, като са нанесени и измерените стойности на началния модул на срязване, получен по динамични методи,  $G_{max,dynamic}$ . Аналогично обобщение е направено и за деформационните модули в недренирано състояние,  $E_{u,cyclic}$  (Фиг. 15) и затихването на материала,  $\xi$  (Фиг. 16).

Съпоставени са и нормализираните максимални деформационни модули,  $E_{max,static}/f(e)$  (изчислени от Фаза 1 на всеки тест) – Фиг. 17. При известен деформационен модул,  $E_{u,cyclic}$ , и осова деформация,  $\varepsilon_{a,SA}$ , е получена обвивната („backbone“) крива на материала ( $\sigma_{dev,i} = E_{u,cyclic,i} \cdot \varepsilon_{a,SA,i}$ ) на база  $E-\varepsilon_{a,SA}$  зависимост (Фиг. 18).

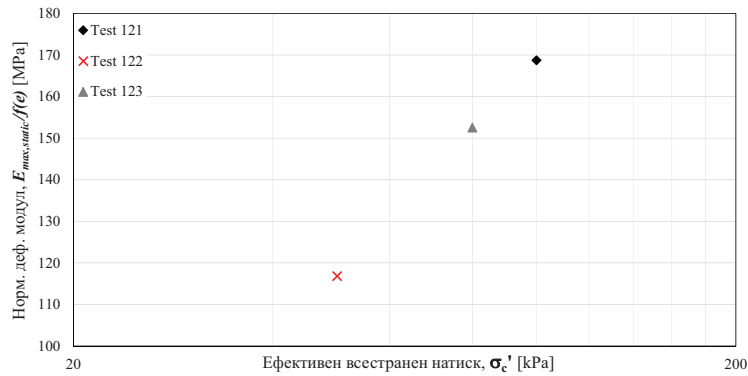
На Фиг. 19 и Фиг. 20 е направено сравнение на нормализираната крива на деградация на коравината и градацията на коефициента на затихване със зависимости, които често са препоръчвани в литературата и намират широко приложение в практиката – [4].



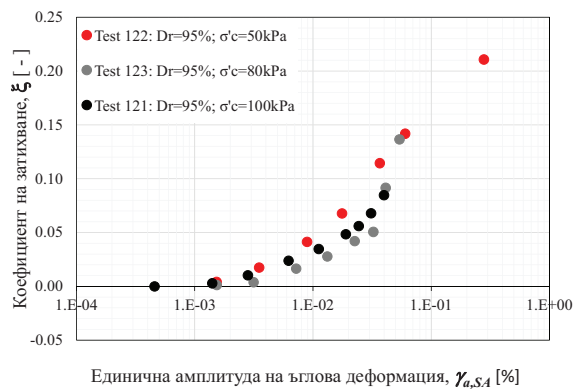
Фиг. 14.  $G-\gamma_{a,SA}$  зависимости



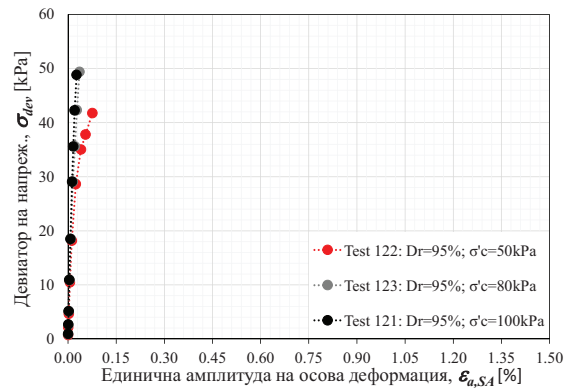
Фиг. 15.  $E-\varepsilon_{a,SA}$  зависимости



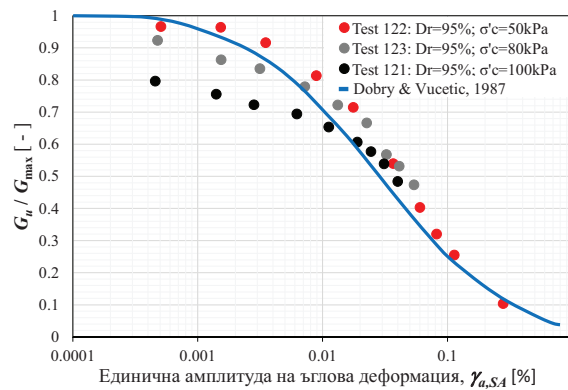
Фиг. 16. Нормализиран начален деформационен модул



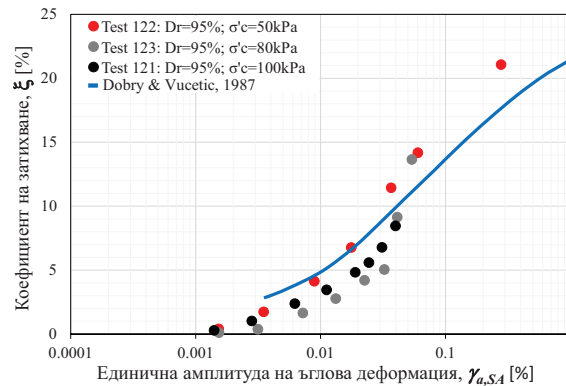
Фиг. 17.  $\xi$ - $\gamma_{a,SA}$  зависимости



Фиг. 18. Обвизни („backbone“) криви



Фиг. 19. Сравнение на нормализираната крива на деградация на коравината със зависимости, препоръчвани в литературата – [4]



Фиг. 20. Сравнение на градацията на коефициента на затихване със зависимости, препоръчвани в литературата – [4]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените съвременни лабораторни методи за определяне на динамични параметри и зависимости на изследвания материал (хвост) са входна информация и база за провеждане на последващ еквивалентен линеен анализ за оценка на сеизмичното реагиране на хвостохранилище „Люляковица“. Този тип анализ позволява на инженерите в практиката да добият представа относно поведението на геотехническите съоръжения, без да имат директна необходимост от сложни изчислителни модели, които работят на база напълно нелинейни предпоставки на материала.

Експериментално получените динамични зависимости (деградацията на коравината на материала в зависимост от ъгловите деформации, коефициента на затихване и коравината при малки деформации – изразена чрез скорост на разпространение на срязващи вълни) показват добро съвпадение с препоръки, които често се дават в литературата и са широко възприети в проектантската практика.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chiaro, G. 2010. *Deformation properties of sand with initial static shear in undrained cyclic torsional shear tests and their modeling*. Tokyo: Department of Civil Engineering, University of Tokyo.
- [2] Geremew, A. and E. Yanful. 2011. Laboratory Investigation of the Resistance of Tailings and Natural Sediments to Cyclic Loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 20, p. 431–447.
- [3] Hardin, B. O. and F. E. Richart. 1963. Elastic wave velocities in granular soils. *Soil Mechanics and Foundations*, 89(1), pp. 33-65.
- [4] Dobry, R. and Vucetic. M. 1987. *Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits*. Proc. Int. Symp. on Gcotech. Engrg. of Sojt Soils. Mexico City. Mexico. 2. 51-87.
- [5] Kramer, S. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. USA: Prentice-Hall.
- [6] Skempton, A. W. 1954. The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4(4), pp. 143-147.
- [7] Suwal, L. P. 2013. *Disk Transducer for Elastic Wave Measurement and Its Application to Unsaturated Sandy Soils*, PhD Thesis. Tokyo: Department of Civil Engineering, University of Tokyo.
- [8] Towhata, I. 2008. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Berlin: Springer.