

## КОНЦЕПЦИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПОВЕДЕНИЕ/РЕАГИРАНЕ НА ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЛЮЛЯКОВИЦА

Н. Керенчев<sup>1</sup>, Л. Михова<sup>2</sup>, З. Бонев<sup>3</sup>, Д. Кисляков<sup>4</sup>,

*Университет по архитектура, строителство и геодезия – София*

***Abstract:** This paper presents some theoretical methods and approaches for estimation of the performance factor for tailing dams. It is based on the real case on seismic slope stability analysis of Liuliakovitsa tailings dam. The paper defines the problem and discusses mostly the theoretical part of the related phenomena. The main goal is to find an expedient approach for performance factor estimation.*

***Key words:** performance factor, tailings dam, slope stability*

Настоящата статия съдържа теоретични постановки и методология за определяне на величини, свързани със сеизмичното поведение на откосни почвени съоръжения, като е акцентирано върху определянето на коефициента на реагиране  $R$ , респ. коефициента на поведение  $q$  като реципрочна стойност на  $R$ . Отразени са основни съображения и зависимости за коефициента на реагиране, дадена е интерпретация на термините дуктилност, критерий за повреди, сеизмичен коефициент, еквивалентно затихване по отношение на почвени материали и масиви. По нататък са разгледани методите за изследване на сеизмична устойчивост на откосни почвени съоръжения, направен е обзор и анализ на нормативни документи с цел да бъде аргументирана и обоснована този тип методика за определяне на коефициента на реагиране.

### 1. Въведение

Както е известно, в основата на Еврокод 8 (БДС EN 1998-1:2005) е залегнала линейната теория на спектралния анализ за изследване на конструкциите, като параметърът коефициент на поведение  $q$  се въвежда в този анализ за редукция на сеизмичните сили, така че последните да съответстват на реалното нелинейно еласто-пластично поведение на конструкцията. У нас за сеизмично проектиране в

---

<sup>1</sup> Николай Керенчев, гл.ас. д-р, бул. Хр. Смирненски 1, kerenchev@hotmail.com

<sup>2</sup> Лена Михова, проф д-р, бул. Хр. Смирненски 1, [lmihova@yahoo.com](mailto:lmihova@yahoo.com)

<sup>3</sup> Здравко Петков, проф д-р, бул. Хр. Смирненски 1 [zbp\\_uacg@abv.bg](mailto:zbp_uacg@abv.bg)

<sup>4</sup> Димитър Кисляков, проф д-р, бул. Хр. Смирненски 1, [kiss\\_fhe@uacg.bg](mailto:kiss_fhe@uacg.bg)

хидротехническото строителство е валидна Наредба №РД-02-20-2/2012г., която също е базирана на линейната теория на спектралния анализ, но борави с реципрочната на коефициента на поведение величина – коефициента на реагиране  $R$ . Софтуерните продукти у нас дават възможност при извършване на анализа да бъде въведена една стойност на коефициента на поведение  $q$  (респ.  $R$ ), валидна за цялата конструкция. Сеизмичното поведение на земнонасипни съоръжения в хидротехническото и геотехническото строителство се различава в много голяма степен от сеизмичното поведение на бетоновите, стоманобетоновите и метални конструкции. Причините за това трябва се търсят в безкрайната степен на статическа неопределимост на непрекъснатите среди и способността им да преразпределят напреженията и деформациите по начин, различен от този при прътовите и черупковите конструкции, но преди всичко те се дължат на различната структура на материалите, обуславяща механичното им поведение. Строителните почви са дисперсна пореста среда, проявяваща при земетръс силно изразено хистерезисно поведение с натрупване на пластични деформации, редукция на коравината, генериране на порово налягане и намаляване на якостта на срязване при водонаситени масиви и т.н. Механизмите на разрушение на почвен масив и строителна конструкция са много различни – при почви разрушението не настъпва мигновено, то е предшествано от процес на развитие на девиаторни напрежения и натрупване на деформации на срязване, които водят до формиране на плъзгателни механизми на разрушение. Изследването на устойчивостта за потенциални механизми на разрушение е най-важният аспект на оразмеряването на земнонасипни съоръжения. Това е наложило развитието на специфични методи на решение и утвърждаване на съответна терминология, като Част 5 на Еврокод 8 „Фундаменти, подпорни стени и геотехнически аспекти” в раздела „Устойчивост на откоси” насочва към тях.

## **1. Основни понятия**

### **1.1. Коефициент на реагиране**

За дефиниране на сеизмичните сили в почвени съоръжения, приложени като квазистатични инерционни сили, в световен мащаб е утвърден терминът сеизмичен коефициент  $k_h$  (или квазистатичен сеизмичен коефициент  $k$ ). Сеизмичният коефициент  $k_h$  показва каква част от силата на теглото  $W$  се трансформира в сеизмична сила  $E$ , т.е.

$$(1.1) \quad E = k_h \cdot W,$$

В Наредба №РД-02-20-2/2012г. в частта Хидротехнически съоръжения сеизмичните сили от собствено тегло на почвени съоръжения се дефинират с израза

$$(1.2) \quad E = C.R.K_c \cdot W,$$

където:  $C$  е коефициентът на значимост на съоръжението;  $R$  – коефициентът на реагиране;  $K_c$  – сеизмичният коефициент при основата на съоръжението, чрез който се дефинира ускорението при основата  $PGA = K_c \cdot g$  ( $PGA$  – *Peak Ground Acceleration*).

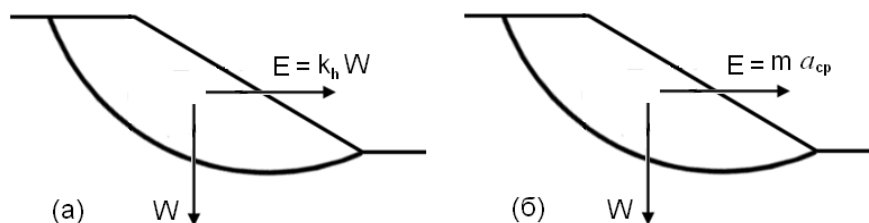
Записът по формула (1.2) съответства на общата формулировка и термини в теорията на спектралния анализ за строителни конструкции.

От формули (1.1) и (1.2) следва, че коефициентът на реагиране  $R$  се изразява чрез сеизмичния коефициент  $k_h$  чрез зависимостта

$$(1.3) \quad R = k_h / (C \cdot K_c),$$

Тъй като почвените масиви и съоръжения представляват непрекъсната среда, основен въпрос, който възниква при сеизмичното им оразмеряване е кои са меродавните „сечения“, за които трябва да се определят оразмерителните сеизмични сили. Отговорът следва еднозначно от съображението, че за откосни почвени масиви е меродавна проверката за устойчивост по отношение на потенциален механизъм на разрушение

На фигура 1 са показани силите, които действат на потенциално хлъзгащо се тяло при квазистатичен модел и при модел на динамичен анализ, като с  $m$  е означена масата, а с  $a_{cp}$  – *еквивалентно средно ускорение* на тялото.



**Фиг. 1.** Сили за хлъзгащо се тяло при квазистатичен модел (а) и при динамичен анализ (б)

От приравняването на хоризонталните сили от двата модела следва, че

$$(1.4) \quad k_h = a_{cp} / g,$$

където  $g$  е земното ускорение.

От изрази (1.3) и (1.4) за коефициента на реагиране  $R$  следва

$$(1.5) \quad R = a_{cp} / (g \cdot C \cdot K_c),$$

Въвеждайки означението  $K_c = PGA / g$ , за  $R$  се получава

$$(1.6) \quad R = a_{cp} / (C \cdot PGA),$$

Имайки предвид, че ролята на коефициента на значимост  $C$  е да скалира стойността на сеизмичната сила по критерий „значимост“ на съоръжението, следва, че физическият смисъл на коефициента на реагиране  $R$  се изразява като отношение на средното ускорение на плъзгащото се тяло и ускорението при основата на съоръжението. Физическият смисъл на сеизмичния коефициент  $k_h$  се изразява като средно ускорение на плъзгащото се тяло, отнесено към земното ускорение.

Така направените пояснения показват, че концепциите и подходите за определяне на сеизмичния коефициент  $k_h$  и коефициента на реагиране  $R$  се препокриват, тъй като това са величини, които са зависими една от друга. В болшинството източници, включително действащите в момента у нас нормативни документи Еврокод 8, Наредба №РД-02-20-2/2012г., стойностите на сеизмичния коефициент  $k_h$ , респ.  $R$ , са дефинирани на базата на исторически опит и емпирични данни без особен диференциран подход към различни съоръжения и обикновено осигуряват консервативни решения, съответстващи на безопасни премествания на масива и „запас“ за устойчивост. В нормативни документи на някои страни са залегнали корелационни зависимости за по-прецизното определяне на сеизмичния коефициент  $k_h$  в зависимост от различни фактори. Тези зависимости са изведени на базата на статистическа обработка на множество емпирични и теоретични данни от внушителен брой реални земетресения и числени анализи.

## **1.2. Дуктилност**

Критерият за дуктилност при почви е свързан с оценка за якостта на срязване. Като *дуктилни* се дефинират почви, които не променят якостта си на срязване при сеизмично въздействие. Обикновено това са нормално уплътнени почви, както и нечувствителни глини, които не демонстрират поведение на деформационно отслабване. Тъй като материалът на хвоста е с висока степен на водонасищане и при земетръс се генерира порово налягане, което редуцира ефективните напрежения в масива, а оттам и якостта на срязване на материала, при този тип съоръжения не може да се разчита на дуктилно поведение. Необходима е оценка за загубата на якост при земетръс, риска от втечняване и постземетръсно разрушение.

## **1.3. Критерий за повреди**

Почвени съоръжения, без наличие на прилежащи към тях конструктивни елементи, е необходимо да се оценяват за повреди по деформационен критерий. Поведението на почвените масиви при сеизмично въздействие се характеризира с акумулиране във времето на перманентни премествания и деформации. Абсолютните стойности на акумулираните (остатъчни) премествания в края на земетресението е необходимо да удовлетворяват деформационен критерий. В

нормативната база няма ясно дефиниран такъв критерий за подобен тип съоръжения като хвостохранилището. Зоните с най-интензивно нарастване (инкремент) на девиаторните деформации са индикация за формиране на потенциални механизми на разрушение (повърхнини на плъзгане).

#### **1.4. Еквивалентно затихване**

Понятието *еквивалентно затихване* се използва при линеен динамичен анализ, при който се дефинира коефициент на вискозно затихване  $\zeta$  (*damping ratio*) по Rayleigh чрез множители  $\alpha$  и  $\beta$ . При провеждане на нелинеен еласто-пластичен анализ с конститутивен модел *HSsmall* за почвените материали на хвостохранилището, хистерезисното поведение се моделира на базата на функцията на деградацията на модула на срязване. Но тъй като моделът има дефицит по отношение на отчитането на хистерезисно поведение при много малки деформации, се изисква въвеждане на допълнително вискозно затихване по модела на Rayleigh, което по литературни данни се приема в границите 3-5%.

## **2. Анализ на съвременни методи и постановки за получаване на сеизмичния коефициент**

В исторически план са утвърдени следните методи за изследване на устойчивостта на откосни почвени съоръжения при сеизмично въздействие (регламентирани като възможни методи за анализ в Еврокод 8, Част 5):

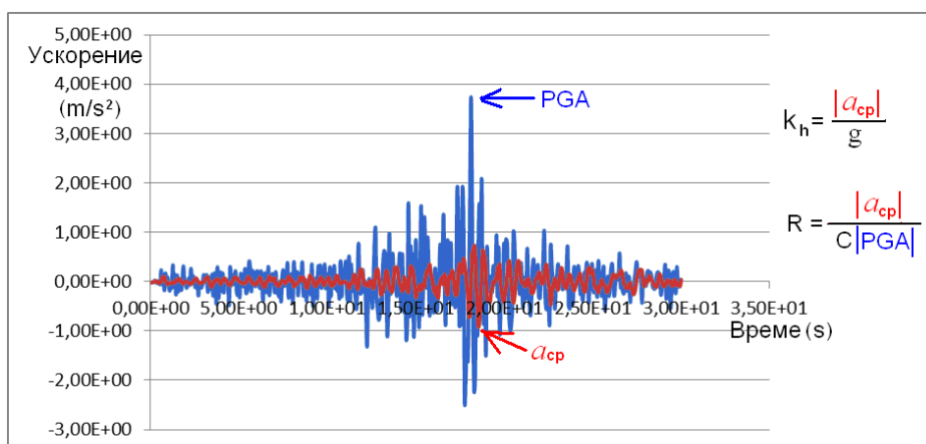
- Квазистатични методи по теория на граничното равновесие [1];
- Методи по теорията на Newmark за перманентни премествания [2];
- Числени методи за динамичен анализ.

Основен недостатък на квазистатичния модел при земетръсно въздействие е, че той не отчита фактора време, а въведеният силов критерий за разрушение чрез коефициента на сигурност съответства на предпоставката за мигновено разрушаване на почвения масив. Характерно за поведението на почвени масиви при земетръс е феноменът на постепенно натрупване на деформации във времето, които могат да доведат, но могат и да не доведат до реализиране на механизъм на глобално разрушаване. При сеизмично въздействие инерционните сили и коефициентът на сигурност  $F_s$  са функция на времето и е възможно в периода на земетресението да се получи  $F_s < 1$ , но тъй като реално това състояние се случва в рамките на много кратко време, то може да доведе до акумулиране на премествания в масива, без да се достигне до състояние на разрушение. Дефицитът на квазистатичните модели в отчитането на акумулираните премествания в почвения масив е преодолян с разработването на методите на перманентни премествания. Предпоставките на методите на перманентни премествания са въведени от Newmark [5]. Потенциалната плъзгаща се почвена маса се моделира като корав блок, който се плъзга върху равнинна основа от почва в гранично състояние. Съпротивлението на срязване

между блока и основата се оценява чрез критичното ускорение  $a_c = k_c \cdot g$ , съответстващо на коефициент на сигурност при квазистатичен анализ  $F_s = 1$ . Когато ускоренията на коравия блок превишат критичното ускорение, в почвения масив се натрупват премествания

Практически дефинирането на сеизмичния коефициент зависи от разпределението на ускоренията в почвения масив и по-точно в частта на потенциалното плъзгащо се тяло. Ето защо в основата на определянето на сеизмичния коефициент стои задачата за получаване на възможно най-близка до реалното поведение картина на ускоренията. Най-точно това се осъществява с провеждането на числен *time history* анализ на съоръжението със съвременен еласто-пластичен конститутивен модел за почвените материали с отчитане на динамичните им характеристики. В деформируема почвена среда вълновото движение е некохерентно. Ускоренията се менят по височина на масива и във времето. Максималните стойности на ускоренията се получават в различни точки по различно време и се задържат за части от секундата. Възможно разпределение на хоризонталните ускорения по височина на откос в даден момент е показано на фигура 2.

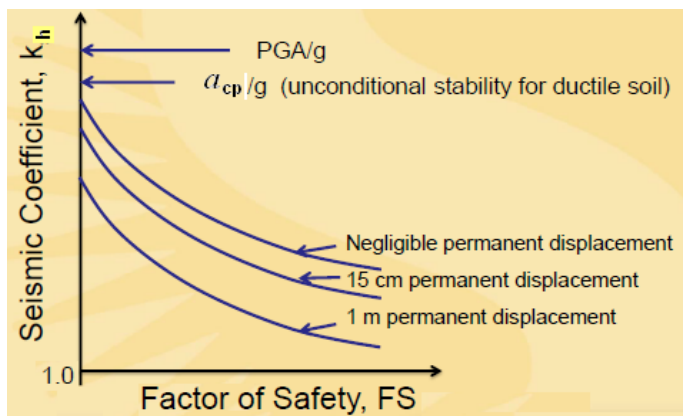
**Фиг. 2.** Посоки на хоризонталните ускорения при: (а) вълна с ниска честота и голяма дължина; (б) вълна с висока честота и малка дължина на вълната [4]



**Фиг. 3.** Определяне на сеизмичния коефициент  $k_n$  и коефициента на реагиране  $R$  чрез еквивалентното средно ускорение  $a_{cp}$

На фигура 3 е илюстрирано определянето на сеизмичния коефициент  $k_h$  и коефициента на реагиране  $R$ , като е показана акселерограмата в основата с максимално ускорение  $PGA$  и функцията на усредненото ускорение  $a_{cp}(t)$  за хлъзгащо се тяло.

Съвременните концепции за определяне на сеизмичния коефициент  $k_h$  включват калибриране на коефициента по допустими премествания и коефициент на сигурност за устойчивост. Съставят се корелационни зависимости в графичен или аналитичен вид за определяне на перманентни премествания като функция на параметри на сеизмичното въздействие и изследвания масив. За целта се ползват методът на Newmark, числени динамични анализи и натурни изследвания, като статистически се обработват множество данни от характерни за района земетресения. За желано максимално преместване, от корелационните зависимости се отчита сеизмичният коефициент, като предпоставката за този коефициент е, че съответства на коефициент на сигурност за устойчивост  $F_s=1$ . С така отчетения сеизмичен коефициент се извършва квазистатично решение. Ако от решението се получи, че  $F_s>1$ , това означава, че в масива ще се реализират по-малки премествания от предварително приетите. На фигура 4 е показана в най-общ вид зависимостта на  $k_h$  от коефициента на сигурност  $F_s$  и от перманентните премествания [3].



**Фиг. 4.** Зависимост на сеизмичния коефициент от перманентните премествания и коефициента на сигурност [3]

### **3. Алгоритъм за определяне на коефициента на реагиране за основна стена и контрастената на хвостохранилище „Люляковица“**

На базата на направените по горе анализи е изведен алгоритъм за определяне на коефициента на реагиране за основната стена и контрастената на хвостохранилище Люляковица, който се състои в изпълнението на следните стъпки:

1). Извършва се *time history* анализ по МКЕ със софтуер Plaxis 2D, като почвените видове се моделират с конститутивен модел HSsmall, а сеизмичното въздействие се задава с акселерограма .

2). Трасира се геометрията на меродавни хлъзгателни повърхнини на базата на картината на нарастването на девиаторните деформации в масива и по методи на теория на граничното равновесие.

3). В мрежа от регулярно разположени подробни точки  $i$  в хлъзгателното тяло (така, че на всички точки да съответстват еднакви приспадащи се маси) се получава функцията на ускорението  $a_i(t)$  за времеви период на земетръсното въздействие.

4). Определя се функцията на усредненото ускорение на хлъзгащото се тяло във времето и се отчита пиковата му стойност  $a_{cp}$ .

5). За хлъзгащото се тяло по формули (1.4) и (1.6) се получават съответно квазистатичният сеизмичен коефициент  $k_h$  и коефициентът на реагиране  $R$  при коефициент на значимост  $C=1$ . Така определените величини  $k_h$  и  $R$  съответстват на конкретната входна акселерограма и на преместванията в съоръжението от нея.

### **Заклучение**

За хвостохранилище Люляковица е представена концепция за определяне на величините коефициент на поведение и коефициента на реагиране за основната стена и констрастената. Тези величини са в съответствие с теорията на линейния спектрален анализ, залегнала в Наредба №РД-02-20-2/2012г. за сеизмично оразмеряване на конструкции. Особеност на подхода за тяхното определяне е необходимостта от дефиниране на меродавен механизъм на разрушение на откоса на стената и получаване на адекватна картина на разпределението на земетръсните ускорения по височина на съоръжението във времето. За целта е необходимо да се извърши числен динамичен анализ на съоръжението с използване на еласто-пластичен конститутивен модел за почвата, който отчита хистерезисното поведение и деградацията на коравината на материала при земетръс.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Михова, Л. Анализ на методите за устойчивост на почвени откоси по теория на граничното равновесие. Сп. "Строителство", бр. 5, 2011, стр. 35-40.
- [2] Михова, Л., Керенчев, Н. Обзор на методите за оценка на перманентните премествания на откоси при сеизмично въздействие. Годишник на УАСГ, Св. IV, Том XLVI, 2014, стр. 7-26.
- [3] Kavazanjian, E., Fulton, A. Evaluating the Seismic Coefficient for Slope Stability Analysis. School of Sustainable Engineering for the Built Environment, Arizona State University, 2013.
- [4] Kramer, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall Inc, 1996.
- [5] Newmark, N. M. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15, 1965, pp.139-159.