СПИСАНИЕ НА БЪЛГАРСКОТО ГЕОЛОГИЧЕСКО ДРУЖЕСТВО, год. 58, кн. 3, 1997, с. 197—203
REVIEW OF THE BULGARIAN GEOLOGICAL SOCIETY, vol. 58, part 3, 1997, p. 197—203

Динамична устойчивост на льос при условия на циклично триаксиално натоварване

Дончо Карастанев[1], Стефан Стойнев[2]

[1] Геологически институт, БАН, 1113 София; E-mail: doncho@geology.acad.bg
[2] Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1156 София

D. Karastanev, S. Stoinev. 1997. *Dynamic resistance of loess under cyclic triaxial loading. Rev. Bulg. Geol. Soc., 58,* 3, p. 197—203.

Abstract. The loess terrain in the Danubian Plain existed for hundreds of millennia under natural moisture regime. During the last decades they received enormous amounts of water. This has inevitably led to a considerable and permanent loess saturation. As a result of this process more and more loess massifs acquire a very unstable state - practically the internal friction between soil particles is absent and the shear strength is determined by only weak coagulation structural bonds. Under these conditions, the loess base, even if uncollapsible, undergoes significant deformation due to strength diminution with time. The hazard becomes still greater, when seismic impact is superimposed to the action of the static load. The seismic wave forces caused by the earthquake induce additional shear stresses at the particles contacts. The combination of weaker structural bonds, decreased effective stresses and the developing positive pore pressure (which cannot be dissipated during the short duration of the seismic shock) can provoke a considerable loss of stability. In these cases for evaluation of the ultimate bearing capacity in stability analysis it is necessary to know the variation of loess strength under dynamic (seismic) action, taking into account the water content too.

Cyclic triaxial tests on typical loess from the region of the town of Svishtov are described in the present paper. The liquefaction resistance ratio R_L for three different degrees of saturation, as well as the long-term vibrodynamic shear strength have been determined on the basis of these experiments. The relationships between cyclic shear stress ratio $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ and number of waves N to initial destroying (liquefaction) have been shown. The obtained results indicate that the dynamic stability of loess depends to a very great extent on water content. The liquefaction resistance ratio for W=16% is about twice lower than that for W = 9%. The ratio for the fully saturated loess is so small (R_L < 0.1 for N > 4), that it can be practically considered that loess possesses no dynamic stability at a degree of saturation S_r > 0.95. A feeble and short seismic impact can lead to elimination of the effective stresses, liquefaction and loss of bearing capacity of the loess base.

The long-term vibrodynamic strength of unsaturated loess (S_r < 0.50) is about 2.7-2.8 times lower than its maximum shear strength, while for water saturated loess it is 8 times lower. Very likely a certain critical moisture content exists, over which an abrupt decrease of dynamic strength takes place. Taking under consideration the obtained results and data from references and practical experience in some cases, it might be assumed that this critical water content is near to the plastic limit W_p. However, a great number of tests on different loess soils and varying degree of saturation, especially in the 0.6 - 0.9 range, should be performed for its precise determination.

Key words: loess, dynamic properties, triaxial test, Danubian plain, Bulgaria

Въведение

Основните геотехнически проблеми на льоса се свързват главно с неговата пропадъчност при намокряне, дължаща се на характерната недоуплътнена структура и на интензивното хидратиране на водонеустойчивите структурни връзки. Поради това в стандартната практика льосовата основа се изследва и осигурява срещу настъпване на недопустими деформации като предварителните мероприятия са насочени към премахване на пропадъчния потенциал, ако е доказан такъв, и към ограничаване на достъпа на вода в основата.

През последните деситилетия в льосовите терени на Дунавската равнина, просъществували стотици хиляди години при естествен влажностен режим, по различни пътища постъпват огромни количества вода. Това неменуемо предизвиква съществено и трайно преовлажняване на льоса, вследствие на което той преминава в неравновесно и силно неустойчиво състояние —почти напълно отсъствува триене между частиците и якостта на срязване се определя само от слаби коагулационни структурни връзки. При тези условия льосовата основа, дори и непропадъчна, претърпява съществени деформации поради намаляване на якостта във времето. Още по-сериозна става опасността, когато към действието на статичния товар се добави и сеизмично въздействие. Породените от труса сеизмични вълни създават допълнителни срязващи напрежения в контактите между частиците. Съчетанието на отслабени структурни връзки, намалени ефективни напрежения и възникването на положително порово налягане (то не може да се разсее за краткото времетраене на труса) може да предизвика значителна опасност от загуба на устойчивост. За такива случаи е необходимо осигуряване на земната основа и спрямо настъпване на I гранично състояние — по носимоспособност. Това изисква да се знае изменението на якостта на льоса при динамично (сеизмично) въздействие и влиянието на водното съдържание върху нея.

Състояние на проблема

Динамичното поведение на строителните почви става обект на научни изследвания през 50-те години на настоящото столетие. Първите по-задълбочени анализи в тази насока са извършени от Казагранде и Шанон (Красников, 1970), Mogami and Kubo (1953), Seed (1960), Голдштейн (1971) и др. Експериментите се провеждат главно с водонаситени пясъци и глини, тъй като при тях неблагоприятните последствия от земетресенията са най-големи. У нас Илиев (1974) поставя началото на целенасочени изследвания върху поведението на строителните почви при сеизмични въздействия. Специално за глините той прави извода, че с увеличаване на водното съдържание силно намаляват якостните показатели (повече кохезията и по-малко ъгълът на вътрешно триене), увеличава се деформируемостта и значително намалява скоростта на разпространение на сеизмичните вълни. През 80-те години у нас започват да се извършват по-детайлни експериментални изследвания върху динамичното поведение на глините (Константинов, 1982) и пясъците (Хамова, 1985).

Сериозни трудности при лабораторните изследвания на динамичната устойчивост на строителните почви е създавало моделирането на действителното напрегнато състояние при условия на сеизмично въздействие. Едва през последните 10-15 години с усъвършенстването на лабораторната техника се създадоха възможности за по-точно пресъздаване на статичното напрегнато състояние в масива, за съхраняване на порния натиск в образеца и възпроизвеждане на динамичните натоварвания.

Въпросът за динамичното поведение на льосовите почви, особено в преовлажнено състояние, става много актуален и важен след Вранчанското земетресение (1977) в Румъния и България, Стражишкото (1986) в България, Хисарското (1989) в Таджикистан и др. Установено е, че последствията от земетресенията са много по-големи при сградите и съоръженията, под които льосът е бил във водонаситено състояние (Minkov and Evstatiev, 1979). Очевидно намаляването на ефективните напрежения и увеличаването порния натиск при сеизмичното натоварване е предизвикало загуба на устойчивост на земната основа поради втечняване. Счита се, че интензивността на сеизмичното въздействие на преовлажнените льосови терени е с 1-2 бала по-висока, отколкото на неводнените територии (Касымов и др., 1980; Зиангиров и др.,1989). Засега обаче особеностите в динамичното (в частност сеизмичното) поведение на льоса не са изучени в необходимата степен. За почви с малка плътност Ellis & Hartman (1967) са стигнали до заключението, че при динамично въздействие якостта на срязване намалява с 10-20%. Някои първоначални експерименти на Ефременко и Вознесенский (1990) с вибрационна микрокрилчатка показват, че динамичната якост на срязване на льоса е с 30-50% по-ниска от статичната. Bally (1988) посочва, че след Вранчанското земетресение (1977) преовлажненият и водонаситен льос в Румъния е станал обект на специални научни изследвания, включително и триаксиални изпитвания при циклични условия на натоварване. В същата публикация се подчертава, че много важен нерешен въпрос за преовлажнения льос е кога и при какви условия може да се стигне до неговото втечняване, но получените данни не са достатъчни за да се даде еднозначен отговор. В нашата страна Константинов (1988) провежда динамични изследвания на льосови почви (от района на гр. Русе) с лабораторен пенетрометър и в условия на плоско срязване. Въз основа на тези експерименти е установено, че водното съдържание W определя в много голяма степен влиянието на динамичните натоварвания върху якостните свойства на льоса. При проби с W, значително под границата на източване W_p, не се е наблюдавало съществено изменение на якостта. С увеличаване на W ефектът от динамичното натоварване нараства, като максимално намаляване на якостта се наблюдава при W близо до W_p. Динамични изпитвания на льосови почви в триаксиални условия досега не са извършвани у нас.

Теоретико-методични принципи на определянето на вибродинамичната устойчивост на почвите

Количествено динамичната устойчивост на преовлажнените и водонаситени почви се оценява чрез т.н. фактор на протичане F_L, който представлява отношение на съпротивлението срещу втечняване R_L и интензивността на динамичното (сеизмичното) натоварване L, а именно

$$F_L = R_L / L. \tag{1}$$

При $F_L < 1$ за съответния почвен слой се счита, че ще настъпи втечняване.

Числената стойност на L зависи от максималното сеизмично ускорение, пълното и ефективното напрежение в масива и от дълбочината на залягането на почвения слой. Определя се по специални формули в зависимост от методиката за определяне на R_L (Seed & Idriss, 1971; Ishihara & Yasuda, 1975; DAERO, 1988).

Съпротивлението срещу втечняване R_L изразява способността на почвите да се съпротивляват срещу цикличните срязващи напрежения. Максималната му стойност се оценява чрез коефициента на цикличните напрежения, който представлява отношение между разрушаващото срязващо циклично напрежение τ_p и началното ефективно вертикално напрежение σ'_v. Съпротивлението срещу втечняване се определя при циклично натоварване в условия на плоско или триаксиално срязване. Техническите предимства, свързани с по-точното моделиране на напрегнатото състояние и съхраняването на порния натиск, предопределят по-голямата използваемост на триаксиалните изследвания. В този случай R_L се изразява чрез зависимостта

$$R_L = \sigma_{dp}/2\sigma_3 = f(N), \quad (2)$$

където σ_{dp} е единична амплитуда на динамичния девиатор; σ_3 — начално всестранно налягане; N — брой на необходимите колебания за разрушаване на образеца.

Зависимостта между коефициента на цикличните напрежения $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ и N се нарича паспорт на динамичната якост и по същество изразява граничното напрегнато състояние, т.е. граничното съпротивление на почвата срещу протичане. Тази зависимост дава възможност за графично определяне на динамичната реакция на изследваната почва. Втечняване може да се очаква, ако конкретното динамично (сеизмично) въздействие, изразено като точка в координатната система $\sigma_{dp}/2\sigma_3$—N, попада над линията на граничното състояние. За построяването на зависимост (2) е необходимо да се направят изследвания върху паралелни образци при поне 5-6 различни стойности на σ_{dp}. Тези стойности се подбират така, че образците да се разрушат (втечнят) при различен брой на колебанията N в диапазона от 3-4 до към 6000. В случая основната цел на проведените изследвания беше построяването именно на горната функционална зависимост за льос с различна степен на водонасищане. Тази крива дава възможност да се определи и дълготрайната вибродинамична устойчивост τ_{lim}. Тя се дефинира чрез максималната големина на тангенциалните циклични напрежения, при които не настъпва втечняване и при неограничено по продължителност вибрационно въздействие. От резултати от експериментални изследвания и от някои теоретични съображения се счита, че функционалната зависимост (2) се описва от уравнение на съставна хипербола (Стойнев и Константинов, 1991). Свободният член на това уравнение представлява вертикалната координата на асимптотата на хиперболата и изразява стойността на дълготрайната динамична устойчивост.

Характеристика на изследваната почва и методика на изпитването

Експериментите бяха извършени с льос от района на гр. Свищов. За целта на изследването бяха взети ненарушени проби във вид на монолити от разкритие на 1,5-2,0 km югоизточно от града по шосето за Полски Тръмбеш. Изследваната льосова разновидност е със специфична плътност ρ_s=2,72 g/cm^3, граница на протичане W_L= 25,4%, граница на източване W_p = 20,0% и показател на пластичност съответно I_p = 5,4%. Зърнометричният й състав е на типична праховa почва — пясъчната фракция (0,1-0,05 mm) е 22%, праховата (0,05-0,005 mm) — 55% и глинестата (< 0,005 mm) — 23%. Съгласно Минков (1968) тя се класифицира като типичен льос.

Изпитванията бяха извършени с образци с височина около 100 mm и диаметър 50 mm. Естественото водно съдържание W_n варираше от 8,0 до 9,0 %, обемната плътност на скелета ρ_d =1,47-1,52 g/cm^3, а обемът на порите n=44-46% (табл. 1). Освен образците с естествено водно съдържание бяха подготвени още две групи образци, така че се получиха общо три групи със стойности за W и степента на водонасищане S_r, както следва:

а) $W = W_n = 8 \div 9$ % $\quad S_r = 0,28 \div 0,30$
б) $W = 16 \div 17$% $\quad S_r = 0,53 \div 0,56$
в) $W = 29 \div 30$ % $\quad S_r = 0,96 \div 1,00$.

За постигане на желаната S_r пробните образци бяха допълнително навлажнявани чрез бюрета. Навлажняването се извършваше бавно (на капки) и равномерно върху цялата повърхност на пробното тяло. След добавяне на точно изчисленото (по съответните зависимости) количество вода пробните образци престояваха по 24 часа във влажен ексикатор, за да се осъществи равномерно разпределение на влагата.

Пълното водонасищане се постигна по т. н. метод на обратното налягане чрез едновременно подаване на налягане в камерата на триаксиалния апарат и вътре в образеца през системата за измерване на поровото налягане. Налягането се подаваше на стъпала през 50 кPa, като всяко стъпало се оставяше да престои 30 минути. След това се провеждаше изпитването при затворена система за измерване на порното налягане.

Якостните изпитвания бяха проведени с динамичен триаксиален апарат DCM-245 на фирмата SEIKEN в катедра "Хидрогеология и инженерна геология" на Минно-геоложкия университет. От всяка от посочените по-горе групи бяха изпитани по 5-6 паралелни образци при различни стойности на единичния динамичен девиатор σ_{dp}, като всеки път се отчиташе броят на необходимите за разрушаване колебания N. Големината на динамичния девиатор е подбирана така, че разрушаването да настъпва в диапазона от 3-5 до 3000-4000 колебания. Опитите бяха изпълнени като неконсолидирани-недренирани без измерване на поровото налягане. Отказването от измерване на поровото налягане беше възприето поради обстоятелството, че при неводонаситените почви, каквито са льосовете, се появава т.н. отрицателен порен натиск, поради което се наблюдава засмукване на вода от системата през порьозната плочка към образеца. Това води до повишаване на водното съдържание на същия и оттам — до некоректни експериментални резултати.

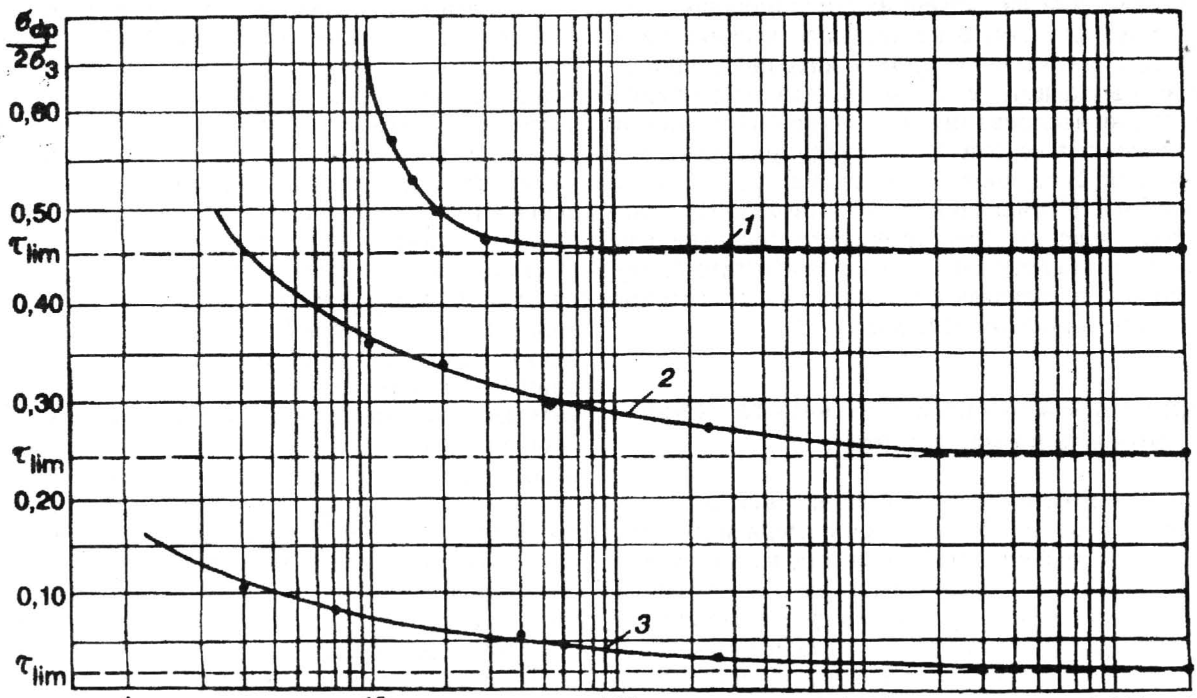
В процеса на цикличното натоварване се извършваше непрекъсната регистрация на осовата деформация и девиатора на главните напрежения. Като критерий за разрушаване (начало на втечняване) беше прието достигане на двойната осова деформация до 10% и релаксация на динамичния девиатор. Всички опити са изпълнени при всестранно налягане σ_3 = 200 кPa и при честота на цикличните колебания 2Hz.

Таблица 1
Водно съдържание и плътностни характеристики на изпитаните образци
Table 1
Moisture content and density parameters of the tested specimens

Проба No	Обемна плътност ρ, g/cm^3	Водно съдържание, W %	Обемна плътност на скелета ρ_d, g/cm^3	Специф. плътност ρ_s, g/cm^3	Обем на порите, *n* %	Коеф. на порите, *e*	Степен на водонасищане, S_r
36	1,65	8,99	1,51	2,72	44	0,80	0,31
37	1,64	8,57	1,52	2,72	44	0,80	0,29
39	1,66	8,94	1,52	2,72	44	0,79	0,31
41	1,64	8,60	1,51	2,72	44	0,80	0,29
38	1,65	8,23	1,52	2,72	44	0,79	0,28
50	1,73	16,57	1,48	2,72	46	0,84	0,53
49	1,72	16,66	1,47	2,72	46	0,85	0,53
51	1,75	16,80	1,50	2,72	45	0,81	0,56
52	1,71	16,46	1,47	2,72	46	0,85	0,53
48	1.77	16.09	1,52	2,72	44	0,79	0.55
34	1,92	29,16	1,49	2.72	45	0,82	0,96
33	1,96	28,96	1,52	2,72	44	0,79	1,00
31	1,93	29,64	1,49	2,72	45	0,82	0,98
44	1,92	29,30	1,48	2,72	45	0,83	0,96
43	1,93	29,44	1,49	2,72	45	0,82	0,97
32	1,95	29,38	1,51	2,72	44	0,80	1,00

Резултати от изследването

Резултатите от проведените изпитвания са представени в табл. 2. По тези резултати са построени графиките на зависимостта $\sigma_{dp}/2\sigma_3 = f(N)$ за трите групи образци (фиг. 1). От получените криви ясно се вижда, че динамичната устойчивост на льоса в много голяма степен се определя от водното съдържание. Така например, R_L при W=16% е около два пъти по-малко, отколкото при W=9%. А при пълно водонасищане съпротивлението срещу втечняване е толкова



Фиг. 1. Зависимост между между коефициента на цикличните напрежения $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ и броя на колебанията за начално разрушаване (протичане) N за льос от района на гр. Свищов
1 — W = 9%, S_r = 0,30; *2* — W = 16%, S_r = 0,54; *3* — W = 29%, S_r = 0,98

Fig. 1. Relationship between cyclic shearing sress ratio $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ and number of waves to initial destroying (liquefaction) N for loess from the region of the town of Svishtov
1 — W = 9%, S_r= 0,30; *2* — W = 16%, S_r = 0,54; *3* — W =29%, S_r = 0,98

Таблица 2

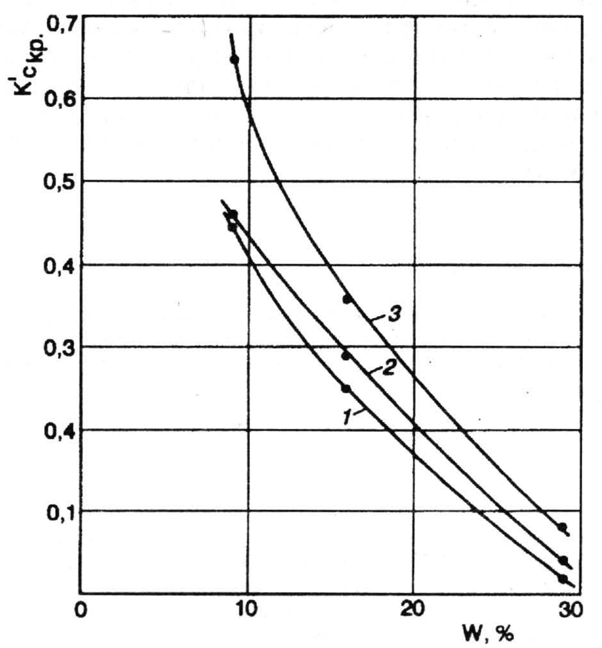
Резултати от триаксиални изпитвания при циклични условия на натоварване на льос от района на Свищов

Table 2

Results of the cyclic triaxial tests of Svishtov loess soil

Проба No	Брой на колебанията за начално протичане, N	Амплитуда на динамичния девиатор, σ_{dp}, кРа	Коеф. нацикл. напрежения, $\sigma_{dp}/2\sigma_3$	Забележка
36	13	229,3	0,573	Изпитани при естествено водно съдържание
37	15	216,6	0,541	
39	19	198,7	0,497	
41	30	188,5	0,471	
38	не се разрушава	180,9	0,452	
50	10	145,2	0,363	Изпитани след допълнително намокряне
49	20	137,6	0,344	
51	55	119,7	0,299	
52	240	109,5	0,274	
48	не се разрушава	99,4	0,248	
34	3	42,3	0,106	Изпитани след пълно водонасищане
33	7	33,1	0,083	
31	40	22,9	0,057	
44	60	17,8	0,045	
43	266	12,7	0,032	
32	не се разрушава	7,6	0,019	

малко ($R_L < 0{,}1$ при $N > 4$), че практически може да се приеме, че льосът не притежава динамична устойчивост при степен на водонасищане $S_r > 0{,}95$. С други думи, съвсем слабо и много кратко сеизмично въздействие ще доведе до анулиране на ефективните напрежения, втечняване на льоса и загубване на носимоспособността на основата.



Фиг. 2. Зависимост между водното съдържание W и критичния сеизмичен коефициент $к'_{Скр}$ при:
1 — безкрайно дълго сеизмично въздействие; *2* — 100 колебания; *3* — 10 колебания

Fig. 2. Relationship between water content W and critical seismic coefficient $к'_{Скр}$ for:
1 — infinitely longterm seismic impact; *2* — 100 waves; *3* — 10 waves

Това се илюстрира още по-добре от представените на фиг.2 зависимости между водното съдържание и критичния коефициент на цикличните напрежения $к'_{Скр}$, над който може да се очаква разрушаване на льоса. Фактически $к'_{Скр}$ представлява един критичен сеизмичен коефициент. Той обаче не съвпада с интегралния сеизмичен коефициент $к_c$, по който през 1987 г. е извършено сеизмичното райониране на България за период от 1000 години. Стойностите на $к'_{Скр}$ при W = 29 % ($S_r = 0{,}98$) са от 10 до 20 пъти по-малки от тези при W = 9 % ($S_r = 0{,}30$). Въобще сухият льос, независимо от продължителността на сеизмичното въздействие има $к'_{Скр} > 0{,}4$, докато при водонаситения льос винаги $к'_{Скр} < 0{,}1$. Несъмнено, като се имат предвид сеизмичните условия у нас, би следвало водонаситеният льос да се счита за сеизмично неустойчива земна основа. Наличните експериментални данни обаче не са достатъчни за да се посочи над каква степен на водонасищане льосът трябва да се приема за потенциално склонен към втечняване при сеизмичните условия на Дунавската равнина.

От кривите на фиг. 1 е определена и дълготрайната вибродинамична устойчивост τ_{lim} за съответното W. Както беше посочено по-горе, тя е равна на максималното циклично срязващо напрежение, при което не настъпва разрушаване дори и при безкрайно продължително динамично въздействие. Ако се приеме, че максималната якост на срязване τ_{max} е равна на якостта на срязване при статични условия, определена от максималната стойност на $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ в точката на допиране на съответната обвиваща на Мор, то по отношението τ_{max}/τ_{lim} би могло да се съди с колко намалява якостта при неограничено по време динамично въздействие. Имайки предвид данни за якостта на срязване на същия льос при статични триаксиални условия на натоварване (Каранев, 1996), в табл. 3 са посочени стойностите на отношението τ_{max}/τ_{lim} при три степени на водонасищане.

Така получените експериментални резултати показват, че докато при неводонаситения льос дълготрайната вибродинамична якост възлиза на около 35% от максималната му якост на срязване, то при водонаситения тя е едва 10%. Прави впечатление също така, че степента на намаление на якостта при динамично въздействие за W = 9% (S_r = 0,30) и за W = 16% (S_r = 0,50) е практически една и съща — отношението τ_{max}/τ_{lim} е съответно 2,84 и 2,75. При W = 30% (S_r = 0,98) обаче стойността на това отношение е вече 8,03. Вероятно съществува някакво критично водно съдържание,

Таблица 3
Отношение на максималната якост на срязване τ_{max} към дълготрайната вибродинамична устойчивост τ_{lim}

Table 3
Ratio between the maximum shear strength τ_{max} and longterm dynamic resistance τ_{lim}

Водно съдържание, W%	Степен на водонасищане, S_r	Максимална якост на срязване, τ_{max} кPa	Дълготрайна вибродинам. устойчивост τ_{lim}, кPa	τ_{max}/τ_{lim}
8 ÷ 9	0,28 ÷ 0,30	257,0	90,4	2,84
16 ÷ 17	0,53 ÷ 0,56	136,6	49,6	2,75
29 ÷ 30	0,96 ÷ 1,00	30,5	3,8	8,03

над което настъпва рязко намаление на динамичната якост. Имайки предвид получените резултати и изхождайки от чужди изследвания и някои случаи от практиката се предполага, че това критично водно съдържание е около границата на източване — в случая W_p=20%. За точното му определяне обаче са необходими голям брой изследвания с различни льосови почви и при различни, но близки степени на водонасищане, особено в диапазона 0,6—0,9.

Заключение

Проведени са изпитвания на типичен льос от района гр. Свищов при условия на циклично триаксиално натоварване. Въз основа на тях е определено съпротивлението срещу разрушаване (втечняване) R_L при три различни степен на водонасищане, както и дълготрайната вибродинамична якост τ_{lim}. Построени са зависимости на коефициента на цикличните тангенциални напрежения $\sigma_{dp}/2\sigma_3$ във функция от броя на колебанията N за настъпване на начално деградиране, т.е. от продължителността на динамичното въздействие.

Получените резултати показват, че динамичната устойчивост на льоса в много голяма степен се определя от водното съдържание. Съпротивлението срещу втечняване при W=16% е около два пъти по-малко, отколкото при W=9%. А при пълно водонасищане то е толкова малко (R_L < 0,1 при N > 4), че практически може да се приеме, че льосът не притежава динамична устойчивост при степен на водонасищане S_r > 0,95. Съвсем слабо и кратко сеизмично въздействие може да доведе до анулиране на ефективните напрежения, втечняване на льоса и загубване на носимоспособността на основата.

Докато при неводонаситения льос (S_r < 0,50) дълготрайната вибродинамична якост е около 2,7-2,8 пъти по-малка от максималната му якост на срязване, то при водонаситения тя е 8 пъти помалка. Вероятно съществува някакво критично водно съдържание, над което настъпва рязко намаление на динамичната якост. Имайки предвид получените резултати и изхождайки от чужди изследвания и някои случаи от практиката се предполага, че това критично водно съдържание е близо до границата на източване. За точното му определяне обаче са необходими голям брой изследвания с различни льосови почви и при различни степени на водонасищане, особено в диапазона 0,6—0,9.

Благодарности

Описаните изследвания станаха възможни благодарение на финансовата подкрепа от Националния фонд "Научни изледвания" към МОНТ, за което авторите са особено благодарни.

Литература

Гольдштейн, М. Н. 1971. *Механические свойства грунтов.* М., Изд. по строительству и архитектуре. 361 с.

Ефременко, С. Д., Е. А. Вознесенский. 1990. Влияние влажности лессовых грунтов на их поведение при вибрационном воздействии. —*Инж. геология, 4,* 19—23.

Зиангиров, Р. С., С. А. Акинфиев, В. И. Щербаков. 1989. Методы и технология инженерно-геологических изысканий на территориях распространения лессовых пород. — В: *Современные проблемы инженерной геологии лессовых пород.* М., Наука, 38—54.

Илиев, Ил. 1974. Влияние на геоложкия строеж на склоновете върху върху тяхната сеизмоустойчивост. — *Изв. Геол. инст., сер. инж. геол. и хидрогеол., 13,* 149—159.

Касымов, С. М., К. Ш. Нурмухамедов, Р. А. Тиллябаев. 1980. Проблемы изучения лессовых пород в сейсмоактивных районах. — В: *Проблемы лессовых пород в сейсмических районах. Тр. Всесоюзного совещания,* Ташкент, 49—60.

Карастанев, Д. 1996. Относно влиянието на водното съдържание върху якостта на льоса. —*Инж. геол. и хидрогеол., 25* (под печат).

Константинов, Б. 1982. *Изменение на свойствата на глини при динамично (сеизмично) натоварване.* Автореф. канд. дис., 36 с.

Константинов, Б. 1988. Изменение на физико-механичните свойства на льоса при динамично натоварване. — *Пътища, 3,* 12—14.

Красников, Н. 1970. *Динамические свойства грунтов и методы их определения.* Л., Стройиздат. 239 с.

Минков, М. 1968. *Льосът в Северна България. Комплексно изследване.* С., БАН. 202 с.
Стойнев, С., Б. Константинов. 1991. Динамична (сеизмична) устойчивост на водонаситени пясъци. — *Год. МГУ, 37,* 3, 79—86.
Хамова, М. 1985. *Определяне на якостните и деформационните характеристики на алувиални пясъци и устойчивост на земната основа при динамични въздействия.* Кандидатска дисертация, ВИАС. 166 с.
Bally, R. J. 1988. Some specific problems of wetted loessial soils in civil engineering. — *Engineering Geology, 25,* 303—324.
DAERO. 1988. *Dynamic analysis of earth and rockfill dams.* Proc. No 53/13/9228 Departamento de Geotecnia, Lisboa. 313 p.
Ellis, W., V. Hartman. 1967. Dynamic soil strength and slope stability. — *Journ. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 93,* 355—375.
Ishihara, K., S. Yasuda. 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion shear test under irregular exitation. — *Soils and Foundations, 15,* 1, 29—45.
Minkov, M., D. Evstatiev. 1979. On the seismic behaviour of loess soil foundations. — In: *Proc. 2nd US National Conf. on Earthquake Eng.,* Stanford University, 988—996.
Mogami, T., K. Kubo. 1953. The behavior of soil during vibration. — In: *Proc of IIIrd ICSMFE,* 257—263.
Seed, H. B. 1960. Soil strength during earthquakes. — In: *Proc. of IInd WCEE, 1,* 67—85.
Seed, H. B., M. Idriss. 1971. A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. — *Journal of the Soil Mech. and Found. Div. ASCE, 97,* SM 9, 249—274.

(Постъпила на 28. 02. 1996 г.)