

ЯКОСТ НА СРЯЗВАНЕ НА ГЛИНИ ПРИ ДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ: ЧАСТ 1. КОРЕЛАЦИОННИ ЗАВИСИМОСТИ

Л. Михова¹, Н. Керенчев²

Ключови думи: динамична якост на срязване, недренирана якост на срязване, циклично натоварване, земетръс, корелационни зависимости

Научна област: Геотехника

РЕЗЮМЕ

Представени са критериите за достигане на разрушение на глини и е дефинирана якостта на срязване при действие на динамично натоварване (монотонно, бързо нарастващо или циклично). Анализирани са резултатите от експериментлни и теоретични изследвания на редица автори и са посочени зависимости за влиянието върху якостта на срязване на фактори като вид, скорост и продължителност на динамичното натоварване, наличие на статично натоварване. Дадени са корелационни зависимости за якостта на срязване, получени по теоретични и експериментални методи, както и критерии за допустимо, „безопасно“ динамично натоварване.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Видът и скоростта на натоварване на почвата оказват съществено влияние върху нейното механично поведение. При монотонно нарастващо натоварване с висока скорост се получава ефект на повишаване на коравината и на якостта на срязване на почвата в сравнение с тези характеристики на поведение при бавно прилагане на натоварването. При наличие на динамично циклично натоварване, оценката за якостта на срязване на почвата е в зависимост от редица фактори като вид на натоварването (хармонично или

¹ Лена Михова, доц. д-р инж., УАСГ, кат. „Геотехника“, бул. „Хр.Смирненски“ 1, София.

² Николай Керенчев, ас. инж., УАСГ, кат. „Геотехника“, бул. „Хр.Смирненски“ 1, София.

нерегулярно), амплитуда, брой цикли и честота на натоварването, наличие на съпътстващо или последстващо статично натоварване, условия за индуциране на порен натиск, и може да бъде направена чрез провеждане на подходяща експериментална програма. Един конвенционален подход за оценка на динамичната якост на срязване е провеждането на стандартни опити със статично натоварване и получената якост на срязване след това се коригира за да се отчетат динамичните ефекти. Този подход се базира на емпирични данни и тук е приложен за оценка на динамичната якост на кватернерни прахови глинени от района на софийското поле, залягащи на дълбочина до 6,0 метра под терена. За глината са определени физико-механични параметри, като са проведени опити с компресионен апарат, плоско срязване и резонансна колона. Експериментално са получени дренажните параметри за якостта на срязване по критерия на Mohr-Coulomb. За недренажната статична якост на срязване, както и за динамичната якост на срязване е направена оценка с помощта на утвърдени корелационни зависимости и съвременни изследвания. Определено е и „безопасното“ динамично натоварване при комбинирано действие със статично натоварване.

2. ЯКОСТ НА СРЯЗВАНЕ НА ГЛИНИ ПРИ ДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ

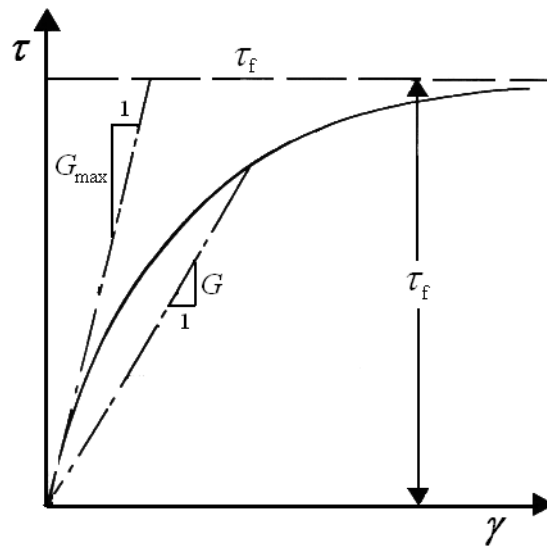
2.1 ОСНОВНИ ДЕФИНИЦИИ

Зависимостта между тангенциалните напрежения τ и деформациите на срязване γ при циклично динамично натоварване на почви е криволинейна, показваща поведение на деформационно отслабващ материал (фиг. 1). Модулът на срязване G намалява с нарастване на натоварването, кривата на зависимостта се стреми към хоризонтална асимптота τ_f , съответстваща на състояние на разрушение с безкрайно нарастващи деформации. Стойността на τ_f или процент от нея се приема за якост на срязване на почвата. Най-често якостта на срязване се дефинира чрез допустимите деформации на срязване при циклично натоварване, като обикновено те са в диапазона 3% – 5%.

Много важна предпоставка при дефинирането на състояние на разрушение на почвата е наличието на статично срязващо натоварване τ_{st} , действащо едновременно с динамичното натоварване τ_{dyn} . В този случай, τ_{st} поражда едностранно развиващи се деформации на срязване γ_{st} , а τ_{cyc} – двузначни циклични деформации γ_{cyc} (фиг. 2). Разрушението на почвата се обуславя от комбинираното действие на статичното и динамичното натоварване.

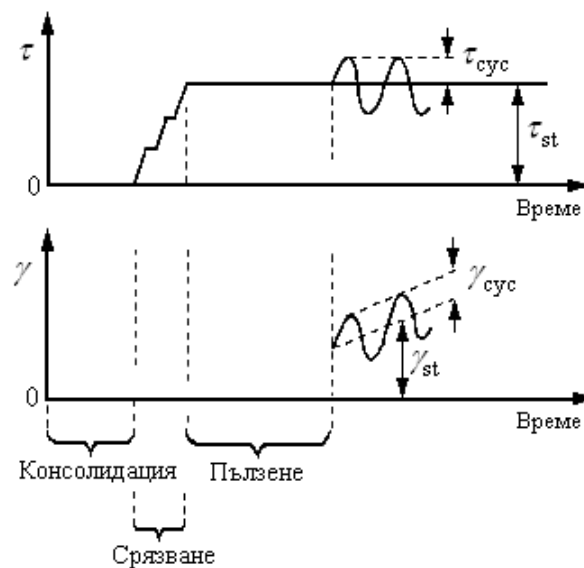
След прекратяване на динамичното натоварване меродавна става статичната якост на срязване, която може да се получи редуцирана спрямо съществуващата преди прилагането на динамичното натоварване. Това отслабване на материала е вследствие на разрушаването на структурни връзки при цикличното натоварване и неговото отчитане е необходимо при изследване на устойчивостта на съоръжения и на носещата способност на земната основа. Според [28] редуцицията на статичната якост при постдинамичното състояние е <10%, когато амплитудата на цикличните деформации не е превишавала $\frac{1}{2}$ от деформациите, съответстващи на статичната якост на срязване. В противен случай се

получава силно отслабване на материала и значителна редукция на статичната якост на срязване.



Фиг. 1

Зависимост между напрежения и деформации при динамично натоварване на почви [10]



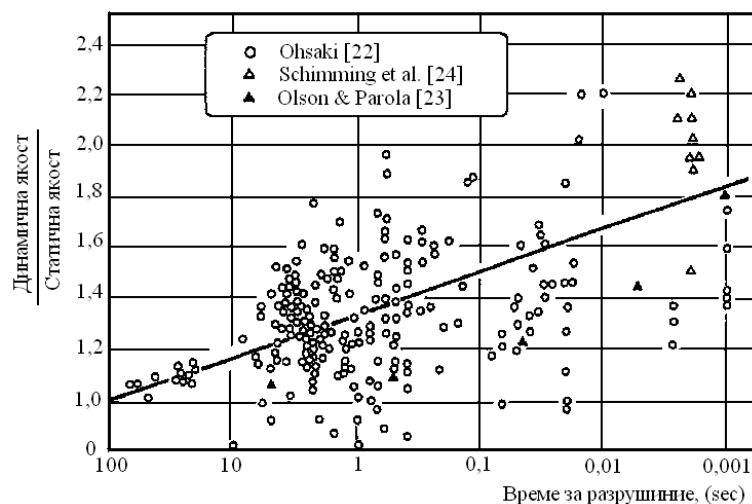
Фиг. 2

Дефиниране на напрежения и деформации при комбинирано действие на статично и циклично натоварване [9]

2.2 ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ЯКОСТТА НА СРЯЗВАНЕ

2.2.1 СКОРОСТ НА НАТОВАРВАНЕ

Съществуват много експериментални изследвания, установяващи зависимостта на якостта на срязване от скоростта на прилагане на натоварването. Една част от изследванията се отнасят за монотонно нарастващо натоварване. Публикациите [5], [29] са първите, в които се представят опитни резултати, установяващи влиянието на скоростта на натоварването върху якостта на срязване при глини. Резултатите показват повишаване на якостта на срязване с 50% при нарастване на натоварването чрез дефиниране на скоростта на деформациите на срязване от 1% до 8000% / (минута). Отношение 1,5 между недренирана динамична и статична якост на срязване получава и авторът Carròl [4]. Обобщение на изследванията за глини е направено в [22], където е получена линейна зависимост между скоростта на нарастване на деформациите на срязване и якостта на срязване (фиг. 3). Анализът на резултатите показва, че якостта на срязване, достигната при време на натоварване 0,25 sec, съответстващо на динамично приложен товар, е с 40% по-висока от якостта на срязване, достигната при време на натоварване 100 sec, което съответства на статично действие на товара. В [18] е установена зависимост, според която якостта на срязване при глини се променя с (15% - 20%) / log (време за натоварване).



Фиг. 3

Зависимост на якостта на срязване на свързани почви от скоростта на нарастване на монотонно натоварване [22]

2.2.2 БРОЙ ЦИКЛИ НА НАТОВАРВАНЕ

При действие на циклично натоварване, честотата и броят на циклите са определящи за якостта на срязване на свързаните почви. Този факт е установен с помощта на триосови опити [7], [25], [26]. Изследвани са образци под действието на статично срязващо натоварване τ_s и циклично срязващо натоварване τ_d с честота 1 Hz, което кореспондира с натоварване от земеръс и машинни фундаменти. Направена е оценка за

якостта на срязване $\tau_{f, cyc} = (\tau_s + \tau_d)_{max}$ чрез съпоставянето ѝ със статичната якост на срязване τ_f . Получени са следните резултати:

- При отсъствие на статично срязващо натоварване, якостта на срязване при едноциклично динамично натоварване е с 40% по-висока от статичната; този резултат съвпада с резултата на увеличаване на якостта на срязване при бързо нарастващ монотонен товар;
- При наличие на статично срязващо натоварване, якостта на срязване при едноциклично натоварване намалява до статичната с нарастване на статичното срязващо натоварване;
- При нарастване на броя цикли, якостта на срязване намалява и става равна на статичната при около 100 бр. цикли;
- С увеличаване на броя на циклите натоварването, което е необходимо за достигане на дадена стойност на деформация, намалява.

Подобни резултати при циклично натоварване с честота 1 Hz на глини са получени по-късно и от други автори. При едноциклично натоварване на глини, авторите на трудовете [1], [17] констатираха повишаване на недренираната якост на срязване на глини от 1,5 до 2,0 пъти спрямо статичната. Зависимостта на нарастване на якостта на срязване при увеличаване на честотата на цикличното натоварване според [1] е $(15\% - 20\%) / \log(\text{честота на натоварване})$.

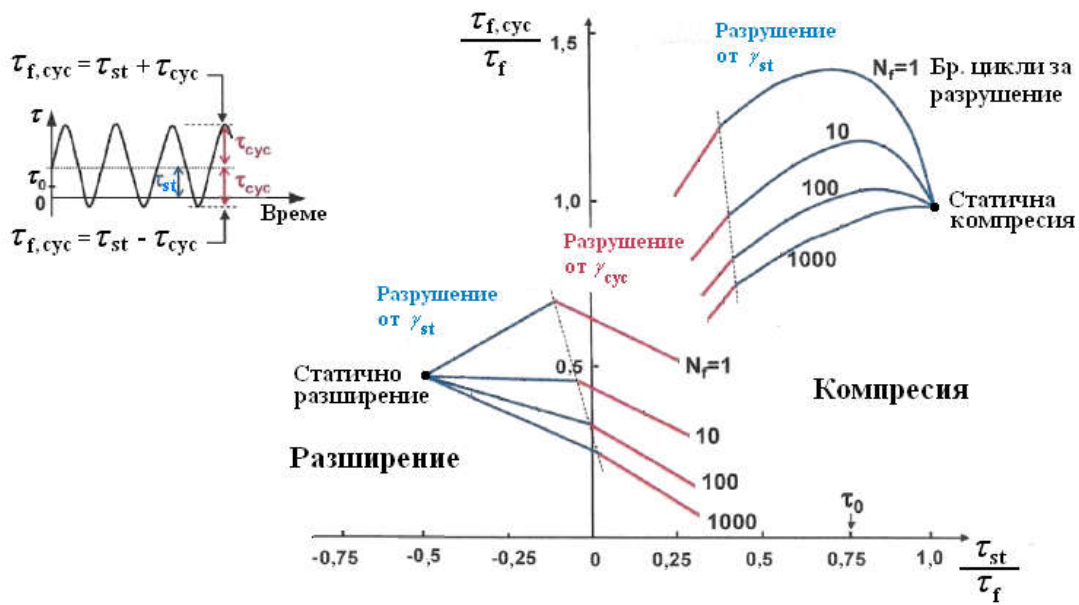
От друга страна, при една и съща честота на цикличното натоварване, с увеличаване на броя на циклите, якостта на почвата намалява и според [2] това намаляване е пропорционално на $\log(\text{брой цикли})$. На фиг. 4 са показани графики на якостта на срязване за глина при различни комбинации на статично и циклично срязващо напрежение и брой цикли на натоварване, получени при триосови опити [6]. Показана е границата на разрушение на почвата вследствие на преобладаващи статични или циклични деформации. При едновременно действие на статично и динамично натоварване, се констатира по-висока якост на срязване спрямо статичната само при ограничен брой цикли – 10 бр. за състоянието на разширяване на почвата и около 100 бр. за състоянието на компресия, като тези цифри се отнасят за случаите на действие на статично натоварване с относително високи стойности, близки до тази на естественото преуплътняване τ_0 на глината. При ниски стойности на статично срязващо натоварване и брой цикли 1000 на динамично натоварване, капацитетът на почвата рязко намалява и якостта на срязване на пада значително под статичната – от 40% при компресия до 80% при разширяване.

Първоначалното повишаване на цикличната якост на срязване спрямо статичната се дължи на тенденцията при краткотрайно натоварване почвата да реагира като материал с по-високи съпротивителни характеристики. Но с увеличаване на броя на циклите настъпва деградация на материала и редукция на якостта на срязване. Деградацията на почвата се изразява и в редукция на нейната коравина, което води до реализиране на по-големи деформации.

Капацитетът на глините по отношение на якостта на срязване при динамично натоварване се влияе от степента на преуплътняване OCR и от показателя на пластичност I_p . С увеличаване на OCR якостта на срязване намалява, а с увеличаване на I_p – нараства.

В [15] се посочва една друга особеност на поведението на глини при циклично натоварване. Когато отношението между динамичното срязващо напрежение и статичната

якост на срязване падне под една гранична стойност *CLRL* (Critical Level of Repeating Loading), никога не се достига състояние на разрушение. Тази граница има стойност в диапазона $CLRL = 0,05 - 0,55$, като по-високите се отнасят за глин с по-голям показател на пластичност [3].



Фиг. 4

Якост на срязване за глина при триосово изпитване с различни комбинации на статично и циклично срязващо напрежение и брой цикли на натоварване [6]

3. КОРЕЛАЦИОННИ ЗАВИСИМОСТИ ЗА ЯКОСТТА НА СРЯЗВАНЕ НА ГЛИНИ

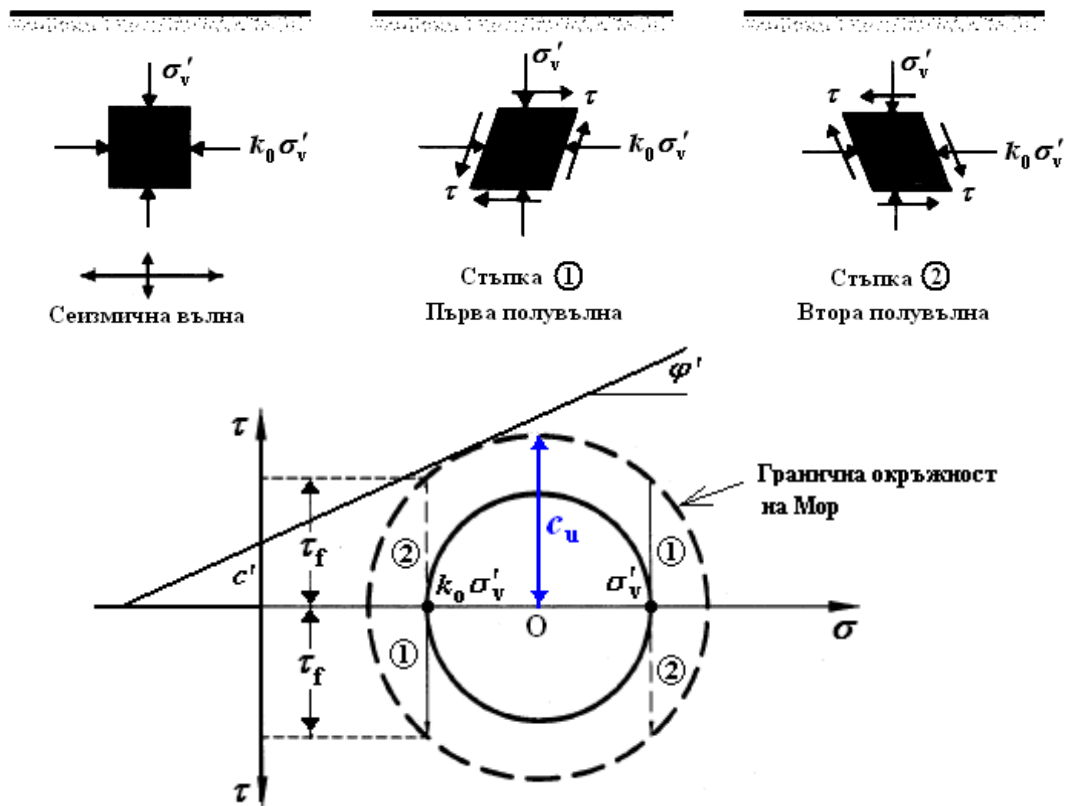
Представени са зависимости за статична якост на срязване на глин. Чрез нея може да се получи якостта на срязване при динамично натоварване, като се приложи конвенционалният подход, при който стойността на статичната якост се коригира с коефициент за отчитане на динамичните ефекти на натоварването.

При краткотрайно динамично натоварване на водонаситени глин е меродавна недренираната якост на срязване c_u . Тя може да се изрази по критерия на Mohr-Coulomb чрез ефективните параметри ъгъл на вътрешно триене ϕ' и кохезия c' . Тогава тези параметри могат да бъдат съпоставени със съответните параметри на статичната якост на срязване. Установено е, че нарастването на якостта на глините при краткотрайно динамично натоварване е за сметка на нарастване на кохезията, докато ъгълът на вътрешно триене не се променя спрямо статичния [12], [13].

В случаите, когато динамичното натоварване на почвата не индуцира порен натиск или неговата стойност е малка и може да се пренебрегне, се ползва дренiranата якост на срязване.

3.1 ЗАВИСИМОСТИ ПО ТЕОРИЯТА НА МОHR-COULOMB

Дадени са изрази за якостта на срязване, получени по модела на Mohr-Coulomb, при предпоставката за наличие на начално геостатично напрегнато състояние и допълнителни срязващи напрежения в хоризонтално и вертикално направление. Това напрегнато състояние съответства на натоварването от сеизмични срязващи вълни, разпространяващи се отдолу нагоре в земната основа (фиг. 5).



Фиг. 5

Напрежения в почвен елемент от вертикално разпространяваща се сеизмична срязваща вълна

- Дренирана якост на срязване [10]

$$\tau_f = \left\{ \left[\frac{1}{2} (1 + k_0) \sigma'_v \cdot \sin \varphi' + c' \cdot \cos \varphi' \right]^2 - \left[\frac{1}{2} (1 - k_0) \sigma'_v \right]^2 \right\}^{0.5}, \quad (1)$$

където: σ'_v е вертикалното ефективно напрежение в земната основа; k_0 – коефициентът на земен натиск в покой.

Формула (1) е подходяща в случаите, когато при натоварването на почвата не се генерира порен натиск.

- **Недренирана якост на срязване на нормално уплътнени глини [14]**

$$c_u = \sin \varphi' \left(c' \cdot \cot g \varphi' + \left(\frac{1+k_0}{2} \right) \sigma'_v \right) . \quad (2)$$

3.2 ЗАВИСИМОСТИ ПО ТЕОРИЯ НА КРИТИЧНОТО СЪСТОЯНИЕ (SAM-CLAY МОДЕЛИ)

Моделът на Mohr-Coulomb не е подходящ за дефиниране на недренирана якост на срязване на преуплътнени глини. Добра корелация за нея дават Sam-Clay моделите по теория на критичното състояние [16], [30].

- $\frac{c_u}{\sigma'_v} = \frac{1}{2} \sin \varphi' \cdot OCR^{(1-C_s/C_c)} ; \quad (3)$

- $\left(\frac{c_u}{\sigma'_v} \right)_{OR} = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v} \right)_{NR} \cdot OCR^{0,8} , \quad (4)$

където: индексът OR се отнася за преуплътнена глина, а индексът NR – за нормално уплътнена глина; C_c – коефициентът на компресия; C_s – коефициентът на набъбване.

3.3 ЕМПИРИЧНИ КОРЕЛАЦИОННИ ЗАВИСИМОСТИ

Дадени са известни емпирични корелационни зависимости между недренираната якост на срязване c_u на глини и параметрите на консистенцията по Atterberg.

- $c_u / \sigma'_v = 0,11 + 0,37 I_p$ (Skempton & Henkel [27]); (5)

- $c_u / \sigma'_v = 0,45 \cdot (I_p)^{0,5}$ при $I_p > 50\%$ (Bjerrum & Simons [21]); (6)

- $c_u / \sigma'_v = 0,18 \cdot (I_L)^{0,5}$ при $I_L > 50\%$ (Bjerrum & Simons [21]); (7)

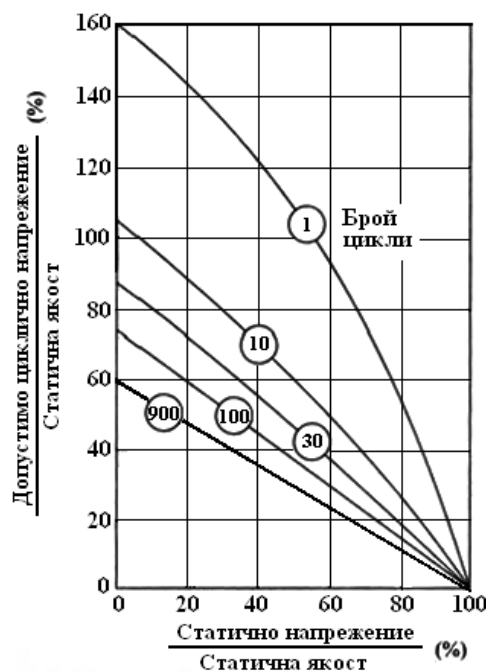
- $c_u / \sigma'_v = 0,5 w_L$ (Karlson & Viberg [21]); (8)

където: I_p е показателят на пластичност; $I_L = (w - w_p)/(w_L - w_p)$ – коефициентът на пластичност; w_L – границата на протичане; w_p – границата на източване; w – водното съдържание.

3.4 ЗАВИСИМОСТИ ЗА ДОПУСТИМО ДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ

Най-важният въпрос за задачите на геотехническото инженерство е каква е стойността на допустимото, „безопасно” динамично натоварване, при което няма да се получи разрушаване на почвата. Сложното поведение на почвите при динамично натоварване и влиянието на редица фактори върху него, е причина да съществуват критерии за допустимо динамично натоварване в доста широк диапазон. Някои от критериите, които се отнасят за случая на отсъствие на статично натоварване в направлението на динамичното, са следните:

- $\tau_{f,cyc} = 0,65 \tau_f$ при земетръс с магнитуд 7,5 [3];
- $\tau_{f,cyc} = 0,60 \tau_f$ при динамично натоварване 900 цикъла с честота 1 Hz [8], [26];
- $\tau_{f,cyc} = 0,50 \tau_f$ при динамично натоварване повече от 10 цикъла и честота 2 Hz [20];
- $\tau_{f,cyc} = 0,40 \tau_f$ при динамично натоварване 1 000 000 цикъла [1], [19].



Фиг. 6

Зависимости за допустими стойности при комбинирано действие на статично и динамично срязващо натоварване на почви [26]

На фиг. 6 са дадени графични зависимости за допустимо динамично срязващо напрежение от 1 Hz на глини при действие на статично срязващо напрежение с различен брой цикли, като напреженията са представени в процент от статичната якост на срязване [26].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Якостта на срязване на глинени в условията на динамично натоварване зависи от скоростта и вида на натоварването (монотонно, бързо нарастващо или циклично), честотата и броя на циклите. При краткотрайно циклично натоварване глините показват средно с 50% по-висока якост на срязване в сравнение със статичната, но с увеличаване на броя на циклите почвата деградира и якостта на срязване пада под стойността на статичната. Друга важна особеност на поведението на глините е, че при водонаситено състояние те работят в условията на недренирана система и в този случай е меродавна недренираната якост на срязване. При наличие на съпровождащо статично срязващо натоварване разрушаването на почвата настъпва вследствие на комбинираното действие на статичното и динамичното въздействие. Оценката на якостта на срязване се извършва с помощта на лабораторни опити с динамично натоварване на образци, като е необходимо експерименталната програма да симулира реалните геотехнически условия. Конвенционален подход за определяне на динамичната якост на срязване е чрез внасяне на корекция в стойността на статичната якост, която отчита динамичния ефект на натоварването. На базата на теоретични и експериментални изследвания са изведени корелационни зависимости за оценка на якостта на срязване при динамично натоварване, в които се ползват физични показатели на почвата и статични якостни параметри.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Andersen, K. H.* Bearing capacity under cyclic loading – offshore, along the coast, and on land. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 5, 2009.
2. *Boulanger, R. W., Idriss, I. M.* Evaluation of cyclic softening in silts and clays. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 6, 2007.
3. *Brorsson, I., Eriksson, L., Larsson, R.* Training course in geotechnical engineering, Swedish Road Consulting AB, Swerod, Stockholm, 1992.
4. *Carroll, W. F.* Dynamic bearing capacity of soils. Vertical displacement of spread footings on clay: Static and impulsive loadings. Technical Report No. 3-599, Report 5, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. 1963.
5. *Casagrande, A., Wilson, S. D.* Effect of rate of loading on the strength of clay and shales at constant water content. Geotechnique, 2, 1951.
6. *Ehnberg, H., Larsson, R.* Strength degradation of clay due to cyclic loadings and enforced deformation. Swedish Geotechnical Institute, Report N 75, 2012.
7. *Ellis, W., Hartman, V. B.* Dynamic soil strength and slope stability. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, SM 4, 1967.
8. *Gouda, Z. M., True, D. G.* Dynamic loading effects on embedment anchor holding capacity. Civil Engineering Laboratory, Technical Note N-1489, 1977.
9. *Goulois, A. M., Withman, R. V., Hoek, K.* Effect of sustained shear stress on the cyclic degradation of clay. Proceedings Symposium on Strength Testing of Marine Sediments, R. C. Chaney and K. R. Demars, eds., ASTM STP 883, ASTM, Philadelphia, 1985.
10. *Hardin, B. O., Drnevich, V. P.* Shear modulus and damping soils: Design equations and curves. Jour. of the Soil Mechanics and Found. Division, ASCE, 98 (SM7), 1972.

11. *Houston, W. N., Herrmann, H. G.* Undrained cyclic strength of marine soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT6, 1980.
12. *Ishihara, K.* Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, University of Tokyo, 1996.
13. *Ishihara, K., Kasuda, K.* Dynamic strength of a cohesive soil. Proceedings 6th Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Budapest, 1994.
14. *Karstunen, M.* Presentation on soil parameters for drained and undrained analysis, 2012.
15. *Kramer, S. L.* Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington, Prentice Hall, Inc., 1996.
16. *Ladd, C. C., Foot, R.* New design procedures for stability of soft clays. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, 1974.
17. *Lefebvre, G., Pfendler, P.* Strain rate and preshear effects in cyclic resistance of soft clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 1, 1996.
18. *Lunne, T., Andersen, K. H.* Soft clay shear strength parameters for deepwater geotechnical design. Proceedings 6th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics, OSIG, London, UK, 2007.
19. *Malek, A. M., Azzouz, A. S., Baligh, M. M., Germaine, J. T.* Behavior of foundation clays supporting compliant offshore structures. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 5, 1989.
20. *Mitchell, R. J., King, R. D.* Cyclic loading of an Ottawa area Champlain clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 1, 1977.
21. *Obasi, N. L., Anyaegbunam, A. J.* Correlation of the undrained shear strength and plasticity index of tropical clays. Nigerian Journal of Technology, Vol. 24, No. 2, 2005.
22. *Ohsaki, Y.* Dynamic properties of soils and their application. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1964.
23. *Olson, R. E., Parola, J. F.* Dynamic shearing properties of compacted clay. Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, University of New Mexico, 1967.
24. *Schimming, B. B., Haas, H. J., Sax, H. C.* Study of dynamic and static failure envelopes. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, SM 2, 1966.
25. *Seed, H. B.* Soil strength during earthquakes. Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, 1960.
26. *Seed, H. B., Chan, C. K.* Clay strength under earthquake loading conditions. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, SM2, 1966.
27. *Skempton, A. W., Henkel, D. J.* The post Glacial clays of the Thames Estuary at Tilbury and Shell Haven, Proc. 3rd ICSMFF, Zurich, Vol. 1, 1953.
28. *Thiers, G. R., Seed, H. B.* Strength and stress-strain characteristics of clays subjected to seismic loading conditions. Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations. Special Technical Publication 450, ASTM, Philadelphia, 1978.
29. *Whitman, R. V.* The behavior of soils under transient loading. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1957.
30. *Wood, M.* Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge University Press, 1990.

Постъпила: март, 2014.

SHEAR STRENGTH OF CLAYS IN DYNAMIC LOADING: PART 1. CORRELATIONS

L. Mihova, N. Kerenchev

Key words: *dynamic strength of soil, undrained strength, cyclic loading, transient loading, correlations, plasticity*

Research area: *Geotechnics*

ABSTRACT

Definitions of the failure conditions of the clays under transient and cyclic loading are presented. Experimental results for the dynamic shear strength are discussed. Relationships between the resistance of the soil and the following factors the speed of loading, the time of loading, the initial level of a static shear stress are estimated. Correlations of many authors for the shear strength based on theoretical and empirical considerations are presented and rules for the acceptable cyclic stress levels to avoid the soil failure are given.