

УДК 69.00.25

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ УЩІЛЬНЮВАНОВОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА СТАТИЧНОЇ І ДИНАМІЧНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІЇ

А.Т. Свідерський

Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, tolyasv@ukr.net

АНОТАЦІЯ. В роботі показано, що зв'язні ґрунти типу суглинків та глин мають значне згасання, в силу чого істинні значення модулів пружності важко визначити, користуючись виключно традиційними методами. Визначення в цьому випадку модулів пружності пов'язано з необхідністю збудження у ґрунтах високочастотних коливань.

Ключові слова: ґрунти, високочастотні коливання, модуль пружності, згасання

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПЛОТНЯЕМОЙ СРЕДЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.Т. Свидерский

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
03680, Воздухофлотский просп., 31, Киев, Украина, tolyasv@ukr.net

АННОТАЦИЯ. В работе показано, что связные ґрунты вида суглинков и глин имеют значительное затухание, в силу чего истинные значения модулей упругости трудно определить, пользуясь исключительно традиционными методами. Определение в этом случае модулей упругости связано с необходимостью возбуждения в почвах высокочастотных колебаний.

Ключевые слова: почвы, высокочастотные колебания, модуль упругости, затухание

METHOD OF STUDY OF A STRESSED-DEFORMED STATE OF A SIGNIFICANT ENVIRONMENT IN STATISTICAL AND DYNAMIC VIBRATION ACTION

A. T. Svidersky

Kyiv National University of Construction and Architecture
03680, Povitroflotsky av.31, Kyiv, Ukraine, tolyasv@ukr.net

ABSTRACT. It is shown in this paper that loose loam and clay loose soils have significant damping effect, which makes it difficult to determine the true values of elastic modulus using only traditional methods. The determination of elastic modulus in this case is due to the need for excitation in soils of high-frequency oscillations.

Key words: soils, high frequency oscillations, modulus of elasticity, attenuation

Постановка проблеми. Ефективна робота вібраційних машин будівельної індустрії потребує уточненого врахування впливу середовища в розрахунковій схемі «машина - середовище». Тому пошук методик вирішення даної проблеми є актуальним

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1, 2, 5] були виконані дослідження динаміки вібр машин на основі врахування опору середовища хвильовими коефіцієнтами.

Певні методичні підходи викладені в роботі [5], де розглянуто одномірне пружно-пластичне тіло, що моделює ущільнений ґрунт. В розвиток цієї роботи здійснено подальше дослідження на основі як статичного так і динамічного навантаження з урахуванням характеристик ущільнюваного середовища.



Мета і завдання дослідження. Метою статті є розробка загальної методики визначення опору матеріалу під дією статичних та динамічних навантажень робочих органів будівельних машин.

Викладення основного матеріалу. Поведінку ущільнюваного середовища під навантаженням можна показати деякою загальною схемою. В кожному середовищі, яке підлягає ущільненню, є граничне напруження (або комбінація напружень), що представляє собою межу пружності $\sigma_{пр}$, нижче якого в ущільнюючому середовищі розвиваються тільки повністю відновлені деформації. При цьому є і межа в'язко пластичності $\sigma_{вп}$. У діапазоні напруження $\sigma_{пр} < \sigma < \sigma_{вп}$ деформація в середовищі при постійних напругах з часом стабілізуються, але при розвантаженні відновлюються не повністю. Середовище при напруженні нижче $\sigma_{вп}$ знаходиться в граничному стані. Таким чином, в ґрунті можна відзначити дві граничних напруги : межа пружності і межа тривалої міцності ґрунту. В умовах складного напруженого стану між $\sigma_{пр}$ і $\sigma_{вп}$ формується комбінації напружень, які і враховують пружні і пружно в'язкі властивості.

Пружно в'язкі деформації характеризуються тим, що при розвантаженні вони повністю відновлюються. При цьому миттєво відновлюються деформації носять назву пружно миттєвих (істинно пружних), компоненти тензора яких позначаються ε_{ij}^e . Деформації, які відновлюються у часі, називаються пружно в'язкі $\varepsilon_{ij}^{e\sigma}$. Пружні деформації пов'язані з напруженням σ_{ij} законом Гука [3] :

$$\varepsilon_{ij}^e = C_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

В (1) C_{ijkl} грають роль механічні констант, в загальному випадку утворюючи тензор четвертого рангу.

Зупинимось на ізотропному матеріалі, який характеризується всього двома механічними константами:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}^e + \delta_{ij}\lambda\varepsilon_{ij}^e, \quad (2)$$

де μ і λ - постійні Ламе.

Вводячи компоненти девіатора $s_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3\delta_{ij}\sigma_{ij}$; $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - 1/3\delta_{ij}\varepsilon_{ij}$, що визначають зв'язок (2) отримаємо:

$$s_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}^e; \quad \sigma = K\varepsilon_v^e. \quad (3)$$

де

$$\varepsilon_v^e = \varepsilon_{ii}^e; \quad \sigma = 1/3\sigma_{ii}. \quad (4)$$

Таким чином, пружну поведінку ізотропного середовища, може характеризуватися двома константами : G^e та K^e .

Для визначення модулів пружності ґрунту іноді використовується статична розвантаження зразків і по відновленій частині деформації обчислюються статичні модулі, пружності G^e і K^e . Слід відзначити, що відновлюється значення деформації входить і частка «запізнілих» деформацій. Істинно миттєві модулі пружності слід визначати за швидкістю поширення в ґрунті пружних хвиль. Такі модулі іноді називають динамічними модулями у пружності G_0^e і K_0^e . Вони, як правило, перевищують статичні модулі пружності в 2-5 разів. Така різниця в значеннях пружних констант пояснюється тим, що на розвиток пружних деформацій в середовищі впливає внутрішнє тертя.

Найбільш просте формулювання співвідношень, визначають в'язкі деформації ґрунтових матеріалів, виходить з припущення, що швидкість вузьких деформацій пропорційна рівності між діючими напруженнями і напруженнями, відповідними стабільних.

Між постійними Ламі, модулем поздовжньої пружності E , коефіцієнтом Пуассона ν , модулем зсуву G і модулем всебічного стиснення K мають місце такі співвідношення пружних деформацій [5]:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; \quad \mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}; \quad (5)$$

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu; \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}; \quad -1 < \nu \leq \frac{1}{2}.$$

Маючи на увазі, що сумарна швидкість пружно в'язких деформацій складається з швидкості пружних деформацій і швидкості запізнілих деформацій.

$$\varepsilon_{ij}^{ev} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v, \quad (6)$$

Загальні співвідношення можна записати у формі:

$$T_{зап} \cdot e_{ij}^{ev} + e_{ij}^{ev} = \frac{1}{2G_{\infty}^e} [T_{рел} s_{ij} + s_{ij}] \quad (7)$$

$$T_{зап \nu} \cdot \varepsilon_{ij}^{ev} + \varepsilon_{ij}^{ev} = \frac{1}{2K_{\infty}^e} [T_{рел \nu} \sigma + \sigma]$$

Тут $T_{зап}$ і $T_{зап \nu}$ - періоди релаксації відповідного девіатора напруження і середніх напружень.

$$\text{Зауважимо, що } \frac{G_0^e}{G_{\infty}^e} = \frac{T_{зап}}{T_{рел}} \geq 1; \quad \frac{K_0^e}{K_{\infty}^e} = \frac{T_{зап \nu}}{T_{рел \nu}} \geq 1.$$

Розглядаючи співвідношення (7) як лінійні диференціальне рівняння щодо компонентів напруги $\sigma_{ij} = s_{ij} + 1/3 \delta_{ij} \sigma_{ij}$, і, знаючи що компоненти деформації дорівнюють $\varepsilon_{ij} = e_{ij} - 1/3 \delta_{ij} \varepsilon_{ij}$, після очевидних перетворень отримуємо вирази для компонентів тензора напружень:

$$\sigma_{ij} = 2G \{ \varepsilon_{ij}^{ev} \} + \delta_{ij} (K - 2/3G) \{ \varepsilon_{ij}^{ev} \}, \quad (8)$$

де $G \{y\}$ і $K \{y\}$ - інтегральні оператори Вольтера.

Подібним чином можуть бути записані визначальні співвідношення і у вигляді теорії спадкової повзучості, для якої ядром інтегральних операторів у загальному випадку служать функції, що відрізняються від експоненціального виду [5].

Статичні модулі пружності ущільнюючого середовища визначаються за діаграм σ_i , e_i^e і σ , ε_i^e як відношення: $G_{\infty}^e = \sigma_i / e_i^e$ і $K_{\infty}^e = \sigma / \varepsilon_v^e$. Для побудови зазначених діаграм впливає з різних, реалізованих в приладах тривісного стиску напружено-деформованих станів зразка виконувати розвантаження. З розвантаження пружна складова деформації знаходиться як різниця між повною стабільною деформацією, у відповідному напруженому стані зразка середовища, з якого починається розвантаження, і остаточною деформацією $e^P : e_i^e = e_i - e_i^P; \varepsilon_v^e = \varepsilon_v - \varepsilon_v^P$.

В якості ілюстрації такого визначення наведені результати дослідів з списком, виконаних траекторій « роздавлювання » від початкового гідростатичного обтиску



$\sigma_0 = -0.5$ МПа (рис. 1, а-в) [4]. Для виділення в пружних складових ε^e із загальною деформацією ε по досягненні напружених станів, помічених точками А, Б, В, Г проводилося розвантаження до стану $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Пружні стабільні деформації їх обчислювали по відношенню до розмірів, що приймається зразком у розвантаженому стані.

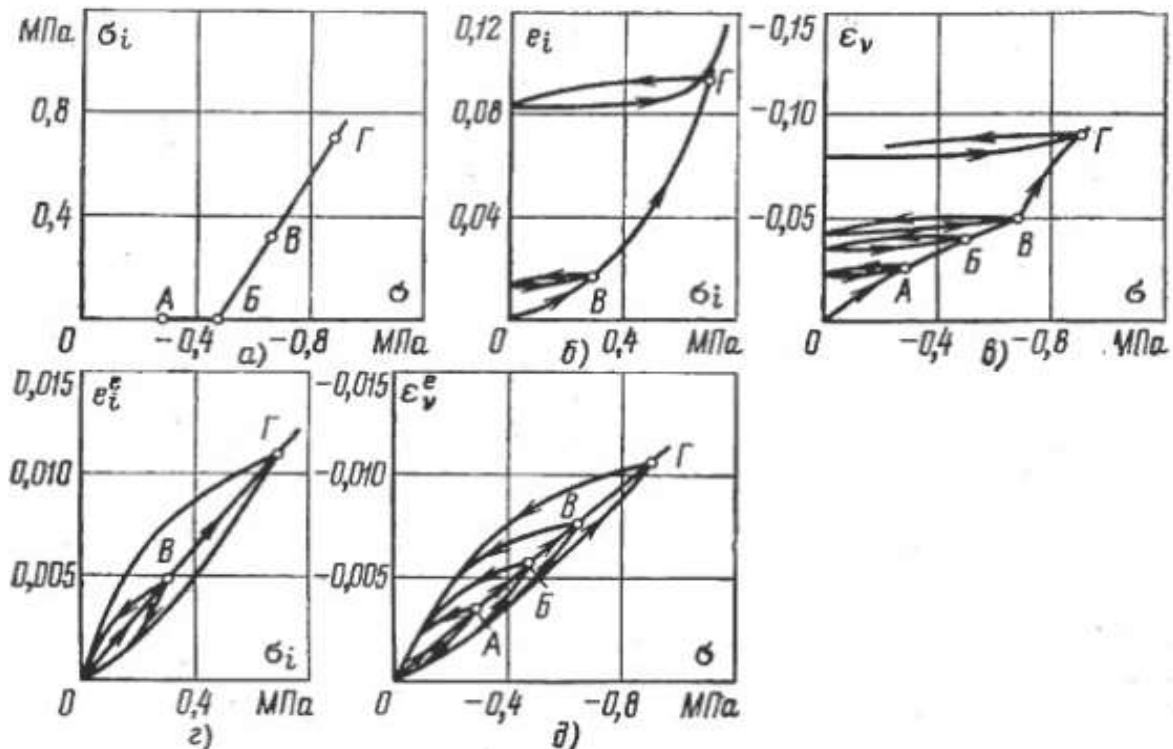


Рис. 1. Пружне деформування ущільнюючого середовища

Аналогічні досліді виконані від початкових гідростатичних обжимів $\sigma_0 = -0,1; 0,3; 0,7; 0,9$ МПа.

Результати дослідів [4] дають можливість виділити пружні деформації і побудувати залежності їх від напруг (рис. 1, г, д). Зауважимо, що якщо кожний наступний напружений стан перевищує попереднє (наприклад, якщо розглядається послідовність напружених станів А, Б, В, Г на рис. 1, а, в яких проводилися розгрузки), то модулі пружної деформації G_∞^e і K_∞^e практично постійні [1].

Для визначення динамічних модулів пружності середовища. Необхідно мати значення швидкостей поширення пружних коливань в ґрунті. Для пружно в'язкого середовища, яке характеризується відношенням (5), існує достатньо складна залежність між швидкістю поширення коливань, реологічними параметрами середовища і довжиною хвилі. Тільки при дуже швидких коливальних процесах реологічні властивості не встигають позначитися на швидкості поширення пружних хвиль. При цьому важливим являється той факт, що ці ґрунти знаходяться в умовах складного статичного напруженого стану, яке, очевидно, значним чином позначаються на пружних характеристиках цих ґрунтів. В роботі [5] методика визначення миттєвих модулів пружності крупно уламкових ґрунтів, яка основана на визначення швидкості розподілення імпульсу пружних коливань у зразку ґрунту в умовах складного статично напруженого стану.

Фіксацією датчиком часу «першого вступання» може бути визначена швидкість істинно пружних коливань матеріалу [6].

На рис.2 наведений типовий графік зміни швидкості повздовжньої хвилі C_p в залежності від об'ємної деформації для випадків, коли прикладання зростаючого девіатора напруження призводить до руйнування матеріалу [4].

$$\Delta C_p = C_p^0 - C_p = A\varepsilon_v. \quad (9)$$

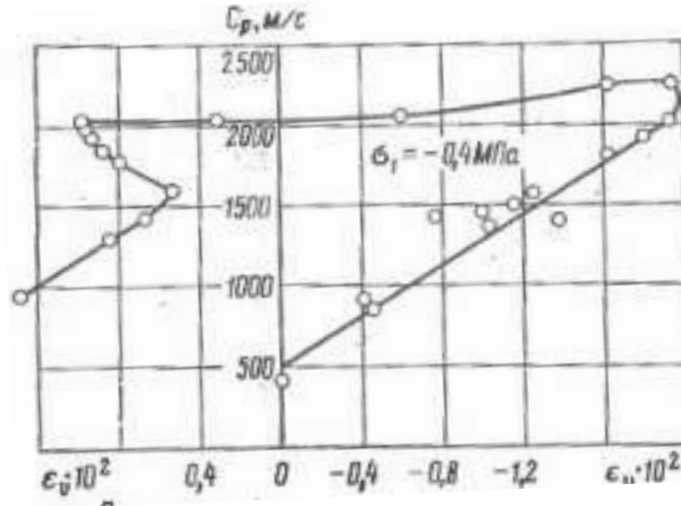


Рис. 2. Залежність швидкості повздовжніх хвиль C_p від об'ємної деформації ε_p .

При розвантаженні, тобто при зменшенні напружень, виконуються тільки пружні деформації, які не супроводжуються перекомпонуванням частин і зміною числа контактів між ними. У його випадку (7) має вигляд:

$$\Delta C_p = B(|\Delta\sigma|)^\alpha. \quad (10)$$

де $\Delta\sigma$ - ступінь зменшення суми головних напружень; B - параметр, який залежить (при інших рівних умовах) від початкової швидкості складання ґрунту. Параметр B зменшується при збільшенні початкової густини складання ґрунту.

Наведена на рис. 3 побудова експериментальних даних по швидкостям пружних хвиль на етапі розвантаження підтверджує відповідність їх степеневій залежності виду (10) при зменшенні як девіаторного, так і гідростатичного напруження. З графіків виходить, що параметр B дійсно зменшується з ростом початкової густини, а показник степені α , рівний кутовому коефіцієнту прямих, складає приблизно 0,65.

Для визначення двох пружних констант зміна швидкості тільки поперечної хвилі виявляється недостатньою. Необхідні визначення швидкості поперечних хвиль, які збуджуються імпульсом. Підбір амплітудно-частотних характеристик віброплити під дією якого збуджуються коливання у зразку, повинен виходити з наступних вимог: а) імпульс не повинен викликати безповоротних деформацій;

б) частота основного тону коливань повинна бути така, щоб довжина хвилі пружних коливань була значно вища максимального шару ущільнюючого середовища.

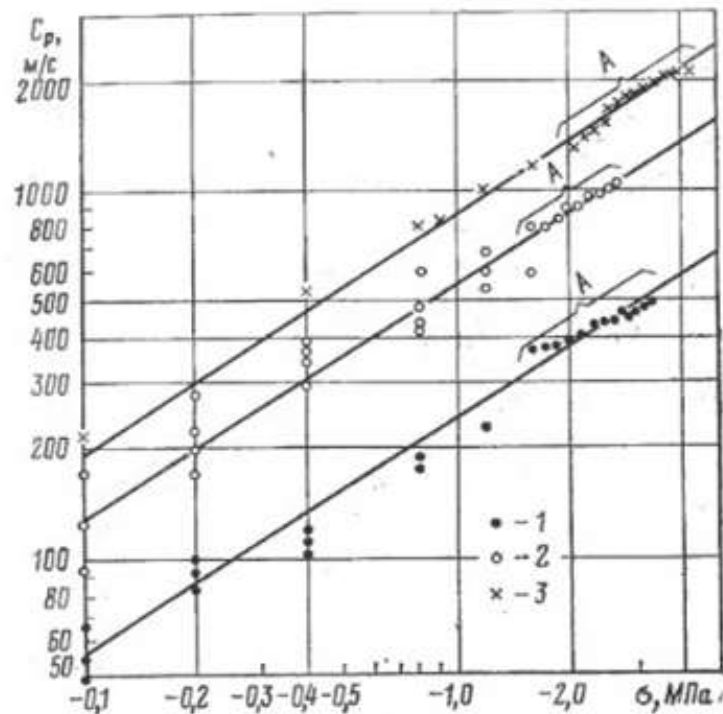


Рис. 3. Залежність швидкості пружних хвиль C_p від середнього напруження σ при розвантаженні.

A-етап зменшення девіатора напруження. 1 – галечник $\rho_0^{CK} = 2,33 \text{ г/см}^3$;

2 – те саме $\rho_0^{CK} = 2,20 \text{ г/см}^3$; 3 – граніт $\rho_0^{CK} = 1,79 \text{ г/см}^3$;

Крім імпульсного методу визначення характеристик пружних властивостей незв'язних ґрунтів є резонансні методи. Суть методу полягає у приведенні ґрунтових зразків у стан резонансу і вимірюванні власних частот крутильних чи повздовжніх вимушених коливань. Цим роботам присвячена. Досвід визначення модулю повздовжньої пружності E і G модуля зсуву резонансним методом узагальнений [1].

У рівняння стану (4) відображаючи пружно в'язкі властивості ґрунту, входять шість параметрів: два статичних модуля пружності (G_∞^e і K_∞^e); два характерних періоди ($T_{зан}$ і $T_{рел}$), які визначають реологічні властивості при зсуві; два періоди ($T_{занv}$ і $T_{релv}$), які визначають реологічні властивості об'ємного стиску. Якщо із статичних навантажень нам відомі значення модулів G_∞^e і K_∞^e , то для визначення $T_{зан}$ і $T_{рел}$, $T_{занv}$ і $T_{релv}$ можна використовувати: метод гармонічних коливань; метод поширення хвиль; резонансний метод.

Запис гістерезисних петель при пружно в'язких коливаннях середовища дає можливість визначити міру внутрішнього тертя і тим самим оцінити $T_{зан}$ і $T_{рел}$.

Висновки

Зв'язні ґрунти типу суглинків глин володіють значним затуханням, в силу чого істинні значення модулів пружності важко визначити, користуючись вказаними вище методами. Визначення в цьому випадку модулів пружності пов'язано з необхідністю збудження у ґрунтах високочастотних коливань.

Література

1. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем.(2-е видання) / Назаренко І.І. – К.: Видавничий Дім «Слово». – 440 с.

2. Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси / Сивко В.И. – К.: Виша шк., 1987. – 168 с.
3. Ляхов Г.М. Распространение и взаимодействие волн сжатия и разрежения в упруго-пластических средах / Г. М. Ляхов, Н. И. Полякова. – М.: Изд-во АН СССР. ОТН «Механика и машиностроение». – 1960.– № 3.
4. Ляхов Г. М. Взрывные волны в грунтах / Г. М. Ляхов, Г. И. Покровский. – М.:Госгортехиздат, 1962.
5. Дидух Б. И. Динамическое взаимодействие трамбуемой плиты с уплотняемым грунтом. «Инженерно-физический журнал». – 1962. – № 2.
6. Дедов О.П. Математична модель та визначення параметрів руху вібротрамбовки для ущільнення ґрунтів // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, – 2006. – Вип.66, – С.41-46

Reference

1. Nazarenko, I.I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiynykh system. (2-e vydannya) [Applied problems of the theory of vibration systems. (2nd edition)]*. Kyiv: Slovo. – (in Ukrainian)
2. Syvko, V.Y. (1987). *Osnovy mekhanyky vybryruемой betonnoy smesy [Fundamentals of the Mechanics of a Vibrating Concrete Mixture]*. Kyiv: Vysha shk. – (in Russian)
3. Lyakhov, H.M., Polyakova, N.Y. (1960). *Rasprostraneniye y vzaymodeystviye voln szhatyya y razrezhenyya v upruho-plastycheskykh sredakh*. Moscow: Mekhanyka y mashynostroeniye, vol. 3. – (in Russian)
4. Lyakhov, H.M., Pokrovskyy, H.Y. (1962). *Vzryvnye volny v hruntakh [Explosive waves in soils]*. Moscow: Hoshortekhyzdat. – (in Russian)
5. Dydukh, B.Y. (1962). *Dynamycheskoye vzaymodeystviye trambuyushchey plyty s uplotnyaemym hruntom [Dynamic interaction of a trample plate with a compacting soil]*. «Ynzhenerno-fyzychesky zhurnal» [Engineering Physical Magazine], 2. – (in Russian)
6. Dedov, O.P. (2006). *Matematychna model' ta vyznachennya parametriv rukhu vibrotrambovky dlya ushchil'neniya gruntiv [Mathematical model and determination of vibration ramp motion parameters for soil compaction]*. *Hirnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, construction, road and reclamation machines]*, Vol.66, 41-46. – (in Ukrainian)

Надійшло до редакції 25.08.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Кузьминець М.П.