

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.347.097

О. Кендзера, канд. фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України,  
заст. директора  
E-mail: kenzera@igph.kiev.ua,  
Ю. Семенова, канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.  
E-mail: ulaska@ukr.net  
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України  
Пр. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

## ДЕФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ҐРУНТОВОЇ ТОВЩІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б. П. Масловим)

Розглянуто методику визначення деформаційних характеристик шарів розрахункових моделей ґрунтової товщі для еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання її реакції на сейсмічні впливи. Продано результати збирання, аналізу і систематизації одержаних в Японії та США результатів лабораторних і польових досліджень деформаційних характеристик ґрунтів. На цій основі створено базу залежностей від величини зсувної деформації  $\gamma$  модуля зсуву  $G$  і коефіцієнта поглинання  $D$  для різних типів ґрунтів, характерних для будівельних майданчиків на території України. Проаналізовано результати дослідження факторів, які впливають на залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ . За результатами аналізу виділено основні параметри, які контролюють форму графіків зазначених залежностей і дозволяють швидко з допустимою точністю підібрати для кожного шару моделі ґрунтової товщі відповідні залежності із сформованої бази даних. Для глинистих порід: це індекс пластичності  $PL$  і глибина залягання; для піщаних порід: розмір частинок, їхній відсотковий вміст і глибина залягання. Представлено результати дослідження впливу епістемічних похибок, які виникають при виборі залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для ґрунтових шарів розрахункової сейсмогеологічної моделі, на параметри амплітудно-частотної характеристики ґрунту, розрахованої з використанням еквівалентного лінійного моделювання коливань ґрунту при землетрусах. Розрахунки виконано з використанням програмного продукту PROSHAKE. Установлено, що похибки при визначенні деформаційних характеристик шарів ґрунту в розрахунковій моделі призводять до зміщення максимумів амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), до зміни коефіцієнтів підсилення коливань, а також до появи "хибних" максимумів на високих частотах.

Створена авторами база даних  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України, дозволяє застосовувати методи моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з урахуванням нелінійної поведінки ґрунтів. Розроблена методика формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі шляхом введення залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , які відображають нелінійні властивості ґрунту, дозволяє (на рівні сучасних знань) максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних. У результаті підвищується обґрунтованість і точність визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних і експлуатаційних майданчиках, що є необхідним для розробки ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проєктованих і наявних об'єктів.

**Ключові слова:** ґрунти, моделі ґрунтів, моделювання сейсмічних коливань, пружні і непружні характеристики ґрунту, епістемічні й випадкові похибки, сейсмічні впливи.

**Вступ.** Механізм поведінки ґрунту при землетрусах залежить від багатьох факторів [3, 4, 22]. Дослідження в галузі поведінки ґрунтів при сейсмічних навантаженнях активно розвиваються, чому значною мірою сприяють лабораторні та польові дослідження зміни деформаційних характеристик ґрунтів під впливом динамічних навантажень.

Відомо, що деформаційні характеристики ґрунту при значних навантаженнях є нелінійними [2], оскільки значення модуля зсуву  $G$  і коефіцієнта поглинання  $D$  змінюються залежно від величини деформації зсуву  $\gamma$  при сейсмічних впливах. При малих деформаціях модуль зсуву вважається максимальним і позначається  $G_{\max}$ . Він пов'язаний зі швидкістю поперечних хвиль  $V_s$  співвідношенням

$$G_{\max} = V_s^2 \rho. \quad (1)$$

При розрахунках реакції ґрунту на сейсмічні впливи з використанням еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання за допомогою таких програмних продуктів, як EERA [11], NERA [10], PROSHAKE [28, 32], DEEPSOIL [17] та ін., необхідно мати емпіричні дані залежностей модуля зсуву  $G(\gamma)$  і коефіцієнта поглинання  $D(\gamma)$  від величини зсувної деформації  $\gamma$  для кожного шару моделі ґрунтової товщі. Ці співвідношення визначаються в результаті польових або лабораторних досліджень зміни деформаційних характеристик ґрунтів під впливом динамічних випробувань ґрунтів. В Україні такі випробування не проводилися, оскільки їхнє проведення вимагають наявності складної, високоточної апаратури. В основному такі дослідження проводяться в Японії та США.

Результати лабораторних і польових досліджень залежності модуля зсуву  $G(\gamma)$  і коефіцієнта поглинання  $D(\gamma)$  від величини зсувної деформації  $\gamma$  найповніше ви-

кладено в роботах [20, 29, 33, 34, 41 та ін.]. За результатами досліджень встановлено, що із збільшенням амплітуди зсувної деформації модуль зсуву  $G$  зменшується, а коефіцієнт поглинання  $D$  збільшується. При цьому закон швидкості зміни цих величин для кожного типу ґрунту виявляється різним.

Авторами зібрано фондові і літературні матеріали вивчення залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , одержані різними дослідниками й опубліковані в різних джерелах [12, 15, 29, 33 та ін.]. Матеріали проаналізовано і систематизовано в комп'ютерній базі даних, яка дозволяє для кожного шару розрахункових моделей ґрунту автоматизувати вибір відповідних залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. База даних продовжує поповнюватися залежностями, сформованими для окремих шарів і для їхніх пачок, які характеризуються різною літологією, фізико-механічними властивостями, потужністю та глибиною залягання.

**Аналіз факторів, що впливають на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання.** У результаті лабораторних випробувань, проведених в 70-х рр. XIX ст., було встановлено перші залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Результати були викладені в роботах [16, 34]. Їхні автори показали, що характер залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації залежить від складу ґрунту, вологості, структурних зв'язків між частинками, глибини залягання шарів тощо.

Сучасні польові та лабораторні методи визначення залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації детально описані, наприклад, в оглядових роботах С. Крамера [25] і Е. А. Возне-

сенського [1]. Загалом польові й лабораторні методи визначення зазначених характеристик ґрунту відрізняються для малих і великих сейсмічних деформацій.

*Вплив коефіцієнта пористості на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.*

При вивченні залежності коефіцієнта поглинання і модуля зсуву від різних факторів впливу дослідники Б. Хардин і В. Дрневич [16] установили, що одним із головних факторів є коефіцієнт пористості. Результати їхніх експериментів на резонансній колонці з ґрунтами не порушеного складу свідчать про зменшення коефіцієнта поглинання зі збільшенням коефіцієнта пористості. Водночас, результати досліджень нормально ущільнених

глин, виконані К. Стокі й В. Айзенхауером у 1981 р. на досконалішій апаратурі, навпаки, не виявили помітної залежності поглинання і модуля зсуву від пористості [19].

У роботах [21, 6; 24] викладено результати детальних досліджень динамічних властивостей ґрунтів залежно від деформації на стандартному японському піску "Тоюога". Дослідження проводилися в умовах всебічного стиску зразків до 100 кПа. На рис. 1 і рис. 2 наведено результати досліджень на зразках різної пористості. Із рис. 1 видно, що зменшення модуля зсуву під дією деформації практично не залежить від величини коефіцієнта пористості для піщаних порід.

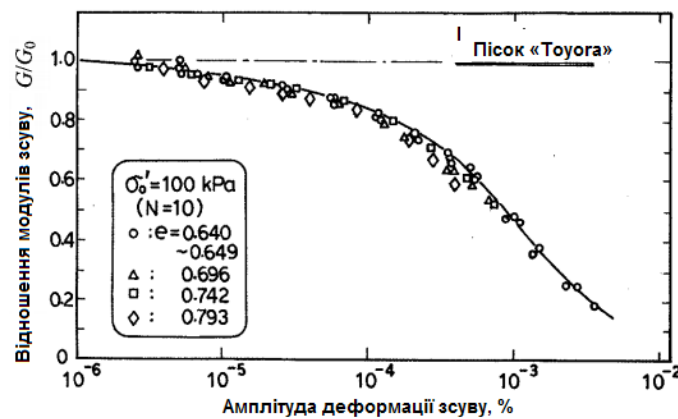


Рис. 1. Залежність нормалізованого модуля зсуву від деформації зсуву для піску "Тоюога" [24]. Різними значками показано результати для різного за величиною коефіцієнта пористості

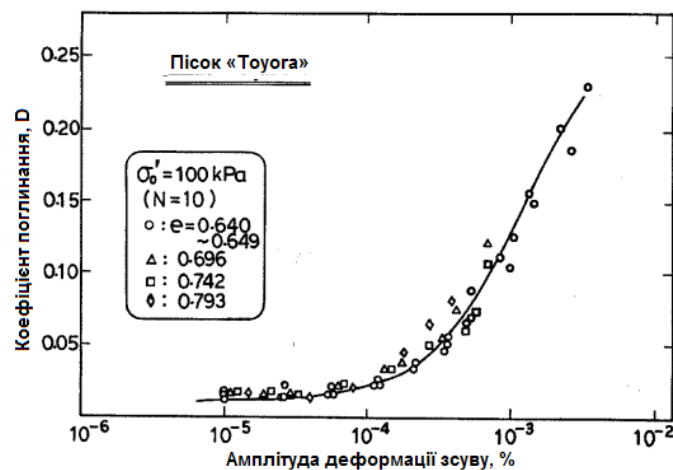


Рис. 2. Залежність коефіцієнта поглинання від деформації зсуву для піску "Тоюога" [24]

Із рис. 2 видно, що коефіцієнт поглинання  $D$  збільшується при зростанні деформації зсуву і досягає  $\sim 0,25$  при величині зсувної деформації  $0,5\%$ . Відношення між коефіцієнтом поглинання і деформацією зсуву не залежить від пористості зразка. Аналогічні результати були отримані для незв'язних ґрунтів у дослідях С. Сагасета [30]. У своїй роботі С. Сагасета відзначає, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву дослідженого ним піску, які залежать від зсувної деформації й напруження всебічного стиску, виявилися практично незалежними від коефіцієнта пористості. Водночас, при узагальненні серії польових досліджень іншими дослідниками, наприклад [5], від-

мічається, що у водонасичених піщаних ґрунтах коефіцієнт поглинання лінійно зростає зі збільшенням коефіцієнта пористості.

*Вплив кислотності середовища на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.*

Характер впливу кислотності середовища на поглинальні властивості розглянуто в роботі Ю. Ванга і В. Сью [42]. Відзначається, що мінімальне значення коефіцієнта поглинання зменшується зі зменшенням значення  $pH$  ґрунту.

*Вплив кількості циклів навантаження на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.*

Івасакі [18, 6] і Кокушо [22] вивчили також вплив кількості циклів навантаження на зміну динамічних параметрів піску "Тоюга". Згідно з одержаними результатами досліджень величини модуля зсуву, отримані в ході 2-го та 10-го циклів навантажень, відрізняються не більше ніж на 10 % при деформації зсуву до  $10^4$ . Приблизно така ж залежність характерна і для коефіцієнта поглинання. Слід відмітити, що при кількості циклів, яка перевищує 10, вплив їхньої кількості стає несуттєвим. Звідси випливає важливий висновок, що практично в усіх випадках розрахунку реакції піщаного ґрунту на сейсмічні впливи

можна нехтувати зміною модуля зсуву і коефіцієнта поглинання внаслідок збільшення кількості циклів навантаження. Виняток становить випадок недренованого піщаного ґрунту при великій деформації зсуву, при якому відбувається значне збільшення тиску порової води [2].

Вплив напруження всебічного стиску від деформації досліджували японські вчені [6, 21, 24, 37]. Зокрема Кокушо [24] узагальнив результати досліджень на трьохосьове циклічне стискування (див. рис. 3 і 4). У цих дослідженнях зразки були ущільнені під тиском 20...300 кПа і потім зазнали циклічного осьового навантаження в недренованих умовах.

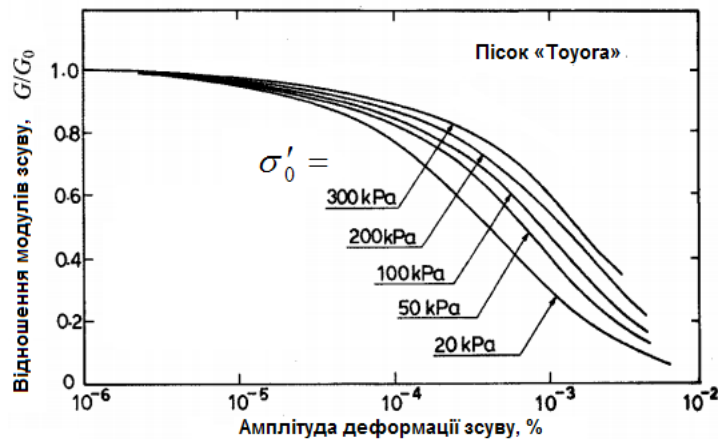


Рис. 3. Вплив величини напруження всебічного стиску на модуль зсуву залежно від деформації за [24]

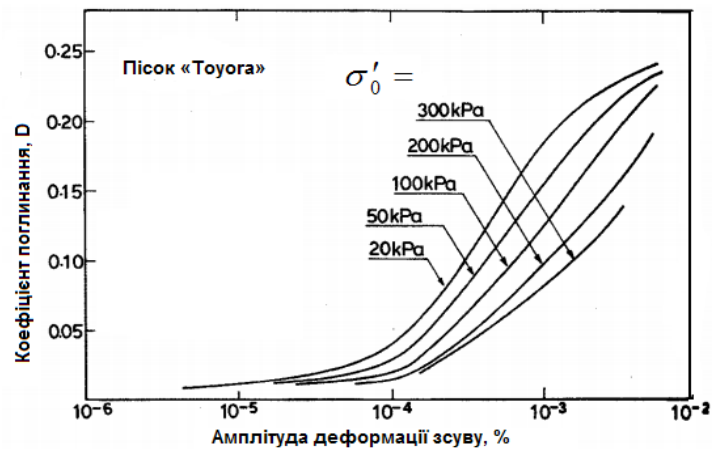


Рис. 4. Вплив величини напруження всебічного стиску на коефіцієнт поглинання залежно від деформації за [24]

Із рис. 3 видно, що швидкість зменшення модуля зсуву зростає разом з деформацією при зменшенні стискальних напружень. Таку закономірність можна пояснити, розглянувши залежність напруження всебічного стиску від міцності  $\tau_f$  і початкового модуля зсуву  $G_0$ .

*Теоретичне пояснення зміни форми залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації при зменшенні всебічного стиску.*

Нехай міцність піску виражається через критерій руйнування Кулона – Мора:

$$\tau_f = \sigma'_0 \operatorname{tg} \phi, \quad (2)$$

де  $\phi$  – кут внутрішнього тертя.

Формула для розрахунку модуля зсуву при малих деформаціях запишеться як

$$G_0 = 8400 \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0,5} \quad (3)$$

де  $e$  – коефіцієнт пористості.

Підставляючи (2) і (3) у рівняння для визначення еталонної деформації  $\gamma_r = \tau_f / G_0$ , отримаємо для чистих пісків відношення еталонної деформації до напруження всебічного стиску:

$$\gamma_r \sim (\sigma'_0)^{0,5} \quad (4)$$

Із рівняння (4) видно, що еталонна деформація зростає разом з напруженням всебічного стиску. Відповідно, збільшення напруження всебічного стиску призводить

до збільшення модуля зсуву при заданому рівні деформації, що підтверджують результати емпіричних досліджень (див. рис. 3).

Аналізуючи поглинальні характеристики для піску "Тоуога", отримані під час тих же досліджень (див. рис. 4), можна зробити висновки, що коефіцієнт поглинання зростає зі зменшенням напруження всебічного стиску. Цей факт можна розглядати як логічний наслідок, якщо припустити, що коефіцієнт поглинання пов'язаний з відношенням модулів  $G/G_0$  залежністю:

$$D = \frac{2r-1}{\pi r+1} \left( 1 - \frac{G}{G_0} \right). \quad (5)$$

Результати досліджень, проілюстровані на рис. 1 і 2, свідчать про наявність залежності між відношенням модулів зсуву  $G/G_0$ , коефіцієнтом поглинання  $D$  і величиною деформації зсуву  $\gamma$ , яка береться як робочий параметр.

*Вплив дренажу на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.*

Результати наведених вище досліджень описують реакцію піску під дією циклічного навантаження в недренованих умовах. Кокушо [24] проводив також серії трьохосових навантажень зразків за наявності дренажу. Результати цих досліджень показали, що при величинах деформацій від  $10^{-6}$  до  $5 \times 10^{-3}$  дренажування практично не впливає ні на модуль зсуву, ні на характеристики по-

глинання піску "Тоуога". Це цілком логічно, якщо врахувати, що ефект дилатансії починає виявлятися при перевищенні деформацією значень  $5 \times 10^{-3}$  [2].

*Дослідження впливу числа пластичності глинистих порід на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.*

Широкомасштабні лабораторні дослідження з виявлення залежності деформаційних характеристик зв'язних ґрунтів від деформації проводилися багатьма дослідниками. Основні результати викладено в роботах [12, 15, 16, 26; 34, 38 та ін.]. Усі вони вказують, що модуль зсуву для глин значно зменшується при перевищенні напруженнями порога пружності.

При проведенні комплексних досліджень на зразках п'яти видів глин з непорушеною структурою Андерсон і Річарт [7] установили, що глини з невеликим числом пластичності (від 20 до 45), відібрані дослідниками в лабораторіях США, характеризувалися величиною недренованої міцності на зсув у діапазоні 70...85 кПа. Тільки в одного зразка глини міцність на зсув становила 15 кПа. На рис. 5 представлено узагальнені результати досліджень з використанням приладу для резонансного випробування колонок ґрунту. Видно, що модуль зсуву починає зменшуватися при перевищенні деформацією значень  $5 \times 10^{-5}$ . Це явище не відповідає поведінці незв'язних ґрунтів, де модуль зсуву починає зменшуватися при перевищенні деформацією значень приблизно  $10^{-5}$  (див. рис. 1 і рис. 2).

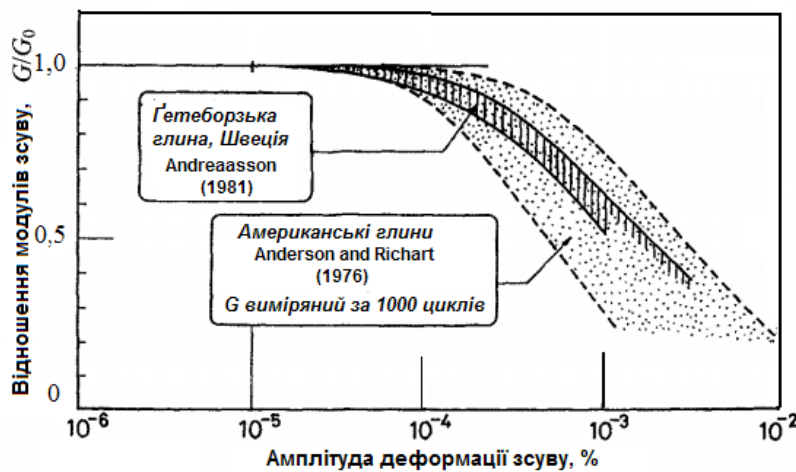


Рис. 5. Криві зменшення модуля зсуву для глин за даними [7, 9]

Андреассон [8, 9] дослідив залежності модуля зсуву від деформації на зразках пластичних глин, відібраних на трьох ділянках у районі Гетеборга (Швеція). Число пластичності глин змінювалося від 20 до 60. Зразки непорушеної структури досліджували в лабораторії з використанням приладу для резонансного випробування колонок ґрунту. На рис. 5 наведено результати польових і лабораторних досліджень зміни величини модуля зсуву для глин за різних рівнів деформації. Видно, що крива зменшення модуля зсуву Гетеборзької глини за формою є подібною до графіка, побудованого Андерсоном і Річартом [7] для американських зразків глин.

У роботах Кім, Новак [23] і Кокушо [25] викладено результати досліджень впливу напруження всебічного стиску на зміну модуля зсуву і коефіцієнта поглинання

в умовах консолідації зразків при зростанні величини зсувної деформації. За результатами циклічних випробувань вказується [25], що зміна напруження всебічного стиску в межах від 45 до 500 кПа практично не впливає на деформування зв'язних ґрунтів непорушеної структури з числом пластичності  $35 \div 55$ . Вплив напруження всебічного стиску на характер залежності коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації виявився незначним.

У роботах [21, 7] показано, що на зменшення модуля зсуву впливають ефективні напруження всебічного стиску, особливо для ґрунтів з низькою пластичністю: зі збільшенням ефективних напружень всебічного стиску (див. рис. 6) поріг "нелінійної поведінки" виявляється за більших значень зсувної деформації.

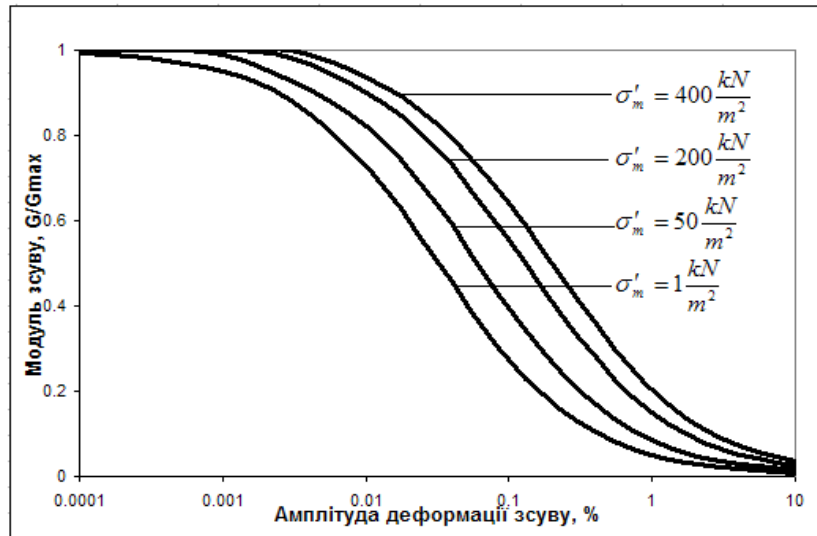


Рис. 6. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для ґрунтів при різних ефективних напруженнях усєбічного стиску (за [21, 6])

Теоретична залежність ефективних напружень усєбічного стиску  $\sigma_m$  та індексу пластичності  $PL$  від модуля зсуву  $G$ .

У роботі [20] наводиться теоретичний аналіз залежності ефективних напружень усєбічного стиску  $\sigma_m$  та індексу пластичності  $PL$  від модуля зсуву  $G$ . Залежність має вигляд

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PL)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PL) - m_0}, \quad (6)$$

$$\text{де } K(\gamma, PL) = 0,5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0,000102 + n(PL)}{\gamma} \right)^{0,492} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$m(\gamma, PL) - m_0 = 0,272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0,000556}{\gamma} \right)^{0,4} \right] \right\} \exp(-0,0145 PL^{1,3}), \quad (8)$$

$n(PL) = 0$  для  $PL = 0$ ,

$n(PL) = 3,37 \times 10^{-6} PL^{1,404}$  для  $0 < PL \leq 15$ ,

$n(PL) = 7,0 \times 10^{-7} PL^{1,976}$  для  $15 < PL \leq 70$ ,

$n(PL) = 2,7 \times 10^{-5} PL^{1,115}$  для  $PL > 70$ .

Ішбаші та Занг [20] вивели емпіричне співвідношення, яке пов'язує коефіцієнт поглинання ґрунту з його модулем зсуву і пластичністю:

$$h = 0,333 \frac{1 + \exp(-0,0145 PL^{1,3})}{2} \left[ 0,586 \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1,547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right]. \quad (9)$$

У цій же роботі вказується, що особливо помітним є вплив напруження усєбічного стиску на модуль зсуву і коефіцієнт поглинання в ґрунтах з низькою пластичністю та наводяться залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для ґрунтів з низьким рівнем пластичності.

Вплив характеру консолідації на форму залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації.

У роботі Кокушо [25] викладено результати досліджень впливу характеру консолідації (нормальне ущільнення, переущільнення, довготривале прикладення ущільнювального тиску) на зміну модуля зсуву і коефіцієнта поглинання у зразках природних глин непорушеної структури з числом пластичності 40...60. За результатами узагальнення даних цих досліджень було встановлено, що характер консолідації ґрунту не чинить помітного

впливу на зміну модуля зсуву і коефіцієнта поглинання. Тому модуль зсуву і коефіцієнт поглинання будуть зменшуватися або збільшуватися в широкому діапазоні деформацій зсуву в тій же пропорції, що й для зразків, які не піддавалися консолідації.

Деформаційні характеристики пісків із вмістом гравію.

Результати досліджень деформаційних характеристик пісків із вмістом гравію викладено в роботі Студера [35]. Його дослідження були викликані необхідністю вивчення сейсмічної небезпеки ділянок під будівництво таких важливих об'єктів, як підпірні греблі та атомні станції. Відібрані зразки ущільнювалися у форми діаметром 15 см і висотою 30 см. Отримані в результаті досліджень залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації представлено на рис. 7 і 8.



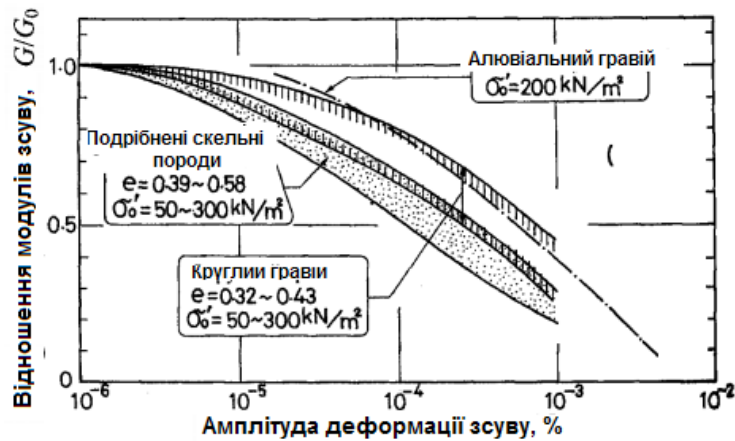


Рис. 7. Залежність модуля зсуву від деформації для крупнозернистих ґрунтів за [24]

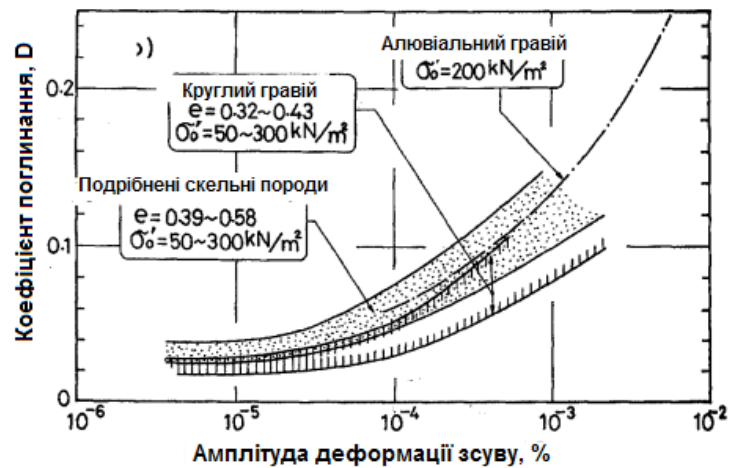


Рис. 8. Залежність коефіцієнта поглинання від деформації для крупнозернистих ґрунтів за [24]

Із рис. 7 видно, що зменшення модуля зсуву для щебеню і круглого гравію проявляється при рівні деформації, вищій від  $5 \times 10^{-6}$ , що є меншим, ніж для чистих пісків. Тому при моделюванні реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з урахуванням нелінійних властивостей ґрунту при виборі для розрахунків залежності модуля зсуву від деформації для гравелистих ґрунтів не варто використовувати залежності, одержані для пісків, що, наприклад, допускалося в роботах [31 та ін.]. Коефіцієнт поглинання для гравелистих ґрунтів починає збільшуватись приблизно на тому ж рівні деформації, що й для піщаних.

У результаті серії досліджень, проведених на зразках роздроблених скельних порід [25], була виявлена тенденція зниження модуля зсуву і зростання коефіцієнта поглинання при збільшенні деформації зсуву. Вона була підтверджена також дослідженнями Студера [30].

Результати досліджень впливу величини всебічного стиску на модуль зсуву і на коефіцієнт поглинання на зразках із вмістом гравію 25 і 50 %, представлених у роботі [36], указують на високий ступінь нелінійності поведінки такого ґрунту навіть за низьких напружень усебі-

чного стиску. Це пояснюється різким зменшенням модуля зсуву і зростанням коефіцієнта поглинання при зменшенні напружень. Модуль зсуву і коефіцієнт поглинання починають змінюватися при нижчому рівні зсувної деформації, ніж це спостерігається в раніше розглянутих зв'язних і незв'язних ґрунтах. При збільшенні кількості циклів навантаження модуль зсуву починає зменшуватися при нижчому рівні деформації. Однак ці властивості ґрунту не є постійними. Вони лише характеризують його конкретний стан.

У результаті аналізу великого об'єму експериментальних даних, представлених у роботах [13, 41 та ін.], зроблено висновки, що на форму кривої зменшення модуля зсуву більше впливає величина індексу пластичності, ніж інші показники.

Проаналізувавши велику кількість результатів динамічних випробувань різних глинистих ґрунтів Вучетич [39, 40] запропонував залежність (див. рис. 9), яка пов'язує порогову деформацію зсуву і число пластичності для таких ґрунтів. Згідно із встановленою залежністю коефіцієнт поглинання починає збільшуватися при виході деформації зсуву за межі ділянки пружності.

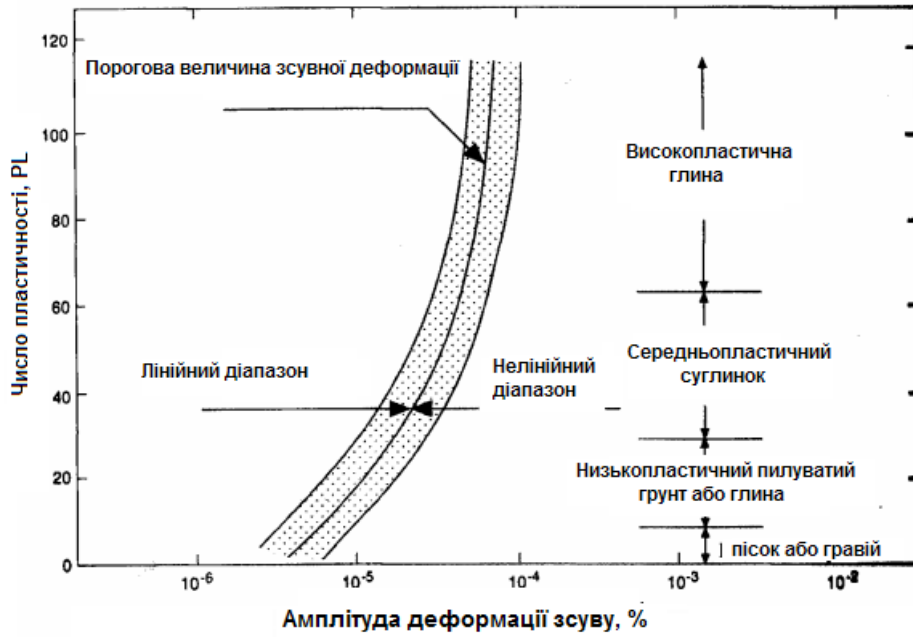


Рис. 9. Взаємозв'язок порогових значень деформації зсуву і пластичності ґрунтів за [39, 40]

За результатами проведених робіт побудовані залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для ґрунтів з різними індексами пластичності *PL* наведено на рис. 10 і 11.

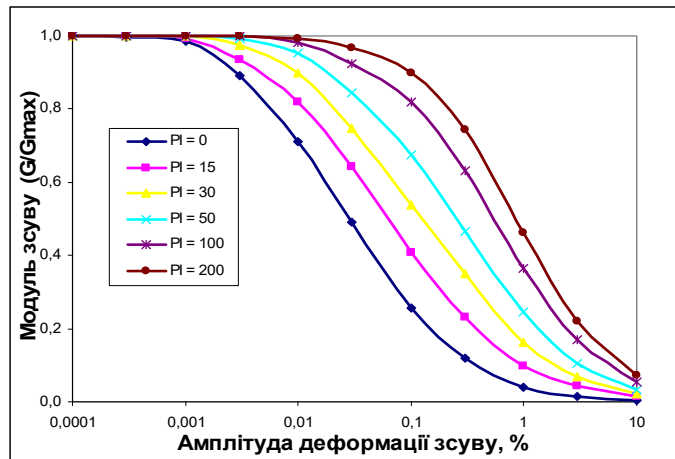


Рис. 10. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для глинистих ґрунтів з різними індексами пластичності (за даними [41])

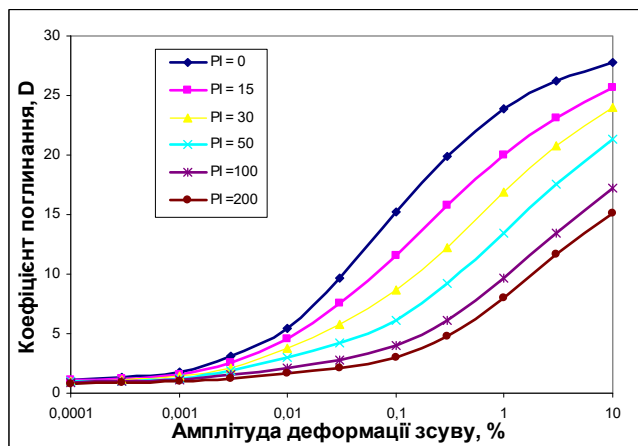


Рис. 11. Залежність коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для глинистих ґрунтів з різними індексами пластичності (за даними [41])

На думку багатьох авторів [33, 41 та ін.], число пластичності може впливати на зміну модуля зсуву і коефіцієнта поглинання. Саме воно контролює форму залежності коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Дослідження Г. Ланзо [33] для глин із числом пластичності 15 і 30 показали, що за однакових умов меншому числу пластичності, як правило, відповідає більший коефіцієнт поглинання. Найчіткіше це виявляється при величині зсувної деформації, починаючи з 0,01 %. У роботах [25, 44] відзначено, що модулі зсуву ґрунтів з високою пластичністю зменшуються повільніше, ніж модулі зсуву низькопластичних ґрунтів.

Із графіків на рис. 10 і 11, побудованих за результатами досліджень [41], видно, що поріг "нелінійної поведінки" ґрунтів з високою пластичністю перебуває в області

більших значень зсувної деформації, ніж для ґрунтів з низькою пластичністю. Цей висновок є важливим при прогнозуванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи.

Для практичного використання можна припустити, що для ґрунтів з індексом пластичності  $PL = 0$  залежність модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації буде близькою до аналогічної залежності для крупнозернистих ґрунтів.

За результатами досліджень, проведених в 90-х рр. XX ст., Айдріс [18] уточнив залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , наведені в роботі [41] для ґрунтів з індексом пластичності  $PL = 30, 50$  і  $100$ . Відмінності в значеннях залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  з робіт [41, 18] подано в табл. 1 і 2.

**Таблиця 1.** Відношення модуля зсуву  $G$  до його максимального значення  $G_{max}$  для ґрунтів з різною пластичністю при різних величинах деформації зсуву за даними [41] і [18]

Деформація зсуву (%)	Відношення $G$ до $G_{max}$					
	$PL = 30$ [41]	$PL = 30$ [18]	$PL = 50$ [41]	$PL = 50$ [18]	$PL = 100$ [41]	$PL = 100$ [18]
0,0001	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,0003	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,001	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00
0,003	0,975	0,99	0,992	0,99	1,000	1,00
0,01	0,898	0,91	0,953	0,95	0,982	0,98
0,03	0,749	0,75	0,846	0,85	0,925	0,93
0,1	0,537	0,55	0,676	0,68	0,818	0,82
0,3	0,350	0,36	0,465	0,48	0,631	0,63
1	0,162	0,17	0,246	0,28	0,365	0,38
3	0,070	0,09	0,105	0,14	0,169	0,18
10	0,023	0,04	0,034	0,06	0,054	0,07

**Таблиця 2.** Коефіцієнт поглинання для ґрунтів з різною пластичністю при різних величинах деформації зсуву за даними [41] і [18]

Деформація зсуву (%)	Коефіцієнт поглинання для ґрунтів з різною пластичністю, %					
	$PL = 30$ [41]	$PL = 30$ [18]	$PL = 50$ [41]	$PL = 50$ [18]	$PL = 100$ [41]	$PL = 100$ [18]
0,0001	1,03	0,2	0,96	0,2	0,90	0,2
0,0003	1,13	0,5	1,04	0,5	0,95	0,5
0,001	1,41	0,8	1,27	0,8	1,14	0,8
0,003	2,15	1,4	1,93	1,4	1,56	1,2
0,01	3,74	3,0	2,95	2,4	2,08	1,9
0,03	5,80	5,1	4,20	3,9	2,82	2,8
0,1	8,64	8,5	6,15	6,2	4,03	4,0
0,3	12,25	12,3	9,17	9,3	6,08	6,2
1	16,86	16,9	13,41	13,4	9,68	9,7
3	20,80	21,1	17,57	17,6	13,46	13,9
10	24,00	26,3	21,35	22,8	17,20	19,1

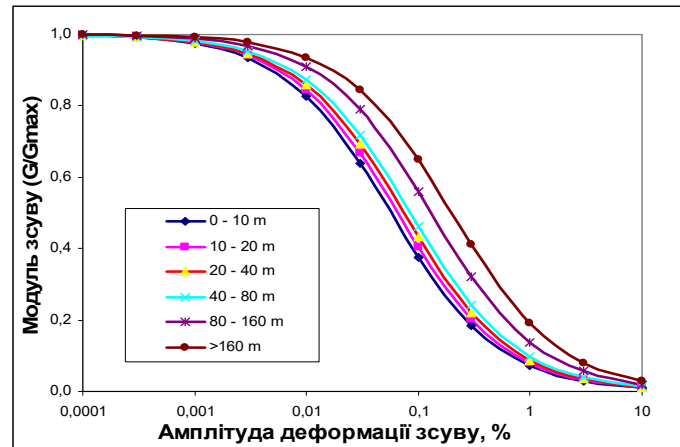
Із табл. 1 і 2 видно, що модуль зсуву в роботах [41] і [18] відрізняється, починаючи з деформації зсуву вищої від 0,003 %, а коефіцієнт поглинання, згідно з [18], є значно меншим від коефіцієнта поглинання, визначеного за даними [41] при значеннях деформації в діапазоні 0,0001 % ÷ 0,1 %. Зазначена відмінність у значеннях модуля зсуву і коефіцієнта поглинання, одержаних у різні роки, указує на необхідність при розрахунках реакції ґрунту на сейсмічні впливи використовувати якомога новіші дані. Як правило, дані, одержані в минулому столітті, є менш точними через використання недостатньо точної апаратури і методики обробки даних. Зміна параметрів

у зазначеному діапазоні зсувної деформації може внести суттєві корективи до результатів розрахунків сейсмічних впливів для ділянок на слабосейсмічних територіях, до яких належить значна частина України.

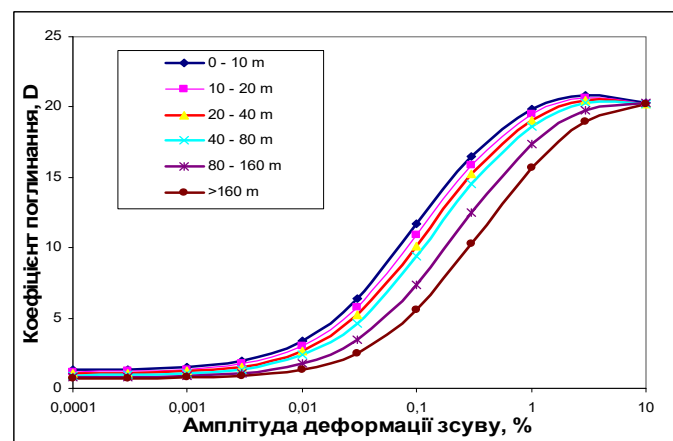
*Вплив розміру частинок та їхнього відсоткового вмісту в піщаних породах на модуль зсуву і коефіцієнт поглинання.*

Результати досліджень впливу розміру частинок піщаних порід з різним відсотковим вмістом на залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  викладено в роботі [29]. На рис. 12 і 13 наведено графіки залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання, побудовані за даними роботи [29]).





**Рис. 12. Залежність модуля зсуву від величини зсувної деформації для ґрунтів із вмістом, менше 30 % частинок з розмірами  $d < 0,075$  мм для різної глибини залягання шарів ґрунту (за даними роботи [29])**



**Рис. 13. Залежність коефіцієнта поглинання від зсувної деформації для ґрунтів із вмістом менше 30 % частинок з розмірами  $d < 0,075$  мм для різної глибини залягання шарів ґрунту (за даними роботи [29])**

На рис. 12 і 13 представлено залежності (за даними роботи [29]), які завдяки використанню вдосконаленої апаратурно-методичної бази уточнили залежності, опубліковані раніше в роботі [14].

У роботі [43] відзначається, що розраховані з використанням записів реальних землетрусів залежності модуля зсуву і поглинання від величини деформації добре узгоджуються із залежностями, отриманими в лабораторних і польових умовах. Завдяки цьому зібрані за останній період часу (1996–2016) в базі даних фондів й опубліковані емпіричні залежності модуля зсуву і поглинання від величини деформації можуть з високим рівнем надійності використовуватися при моделюванні реакції ґрунтів на сейсмічні впливи з урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів.

*Вплив епістемічних похибок при виборі залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації на параметри частотної характеристики моделі ґрунтової товщі.*

В Інституті геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України проведено дослідження впливу епістемічних похибок, які вносяться при виборі відповідних залежностей модуля зсуву  $G(\gamma)$  і коефіцієнта поглинання  $D(\gamma)$  від величини зсувної деформації, на параметри розрахованої частотної характеристики моделі ґрунтової товщі.

На рис. 14 представлено амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) ґрунтової товщі під будівельним майданчиком у Печерському районі м. Києва, розраховану із застосуванням еквівалентного лінійного моделювання за допомогою програмного продукту PROSHAKE. Нелінійні характеристики шарів моделі ґрунтової товщі апроксимувались залежностями  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  двома способами: 1) з урахуванням літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного шару; 2) без урахування літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного шару (тобто з наявністю епістемічних похибок в описанні фізико-механічних властивостей та літологічного складу моделі ґрунтової товщі).

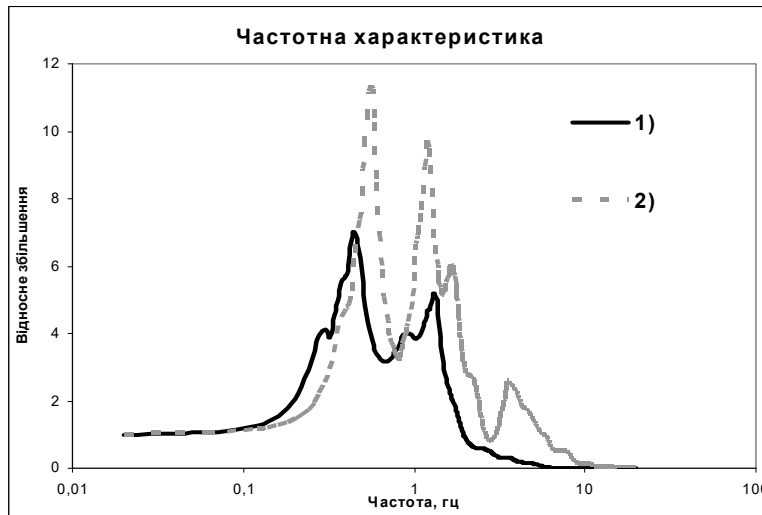


Рис. 14. АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком у Печерському районі м. Києва, розраховані з урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів: 1) вибір залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  виконувався з урахуванням літології кожного із шарів; 2) залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  розраховані з наявністю епістемічних похибок у літологічному складі шарів ґрунтової товщі

Із рис. 14 видно, що у випадку, коли літологічний склад і фізико-механічні властивості при апроксимації нелінійних характеристик кожного із шарів залежностями  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  задаються з похибками, у розрахованій АЧХ моделі ґрунтової товщі в частотному діапазоні від 1

до 10 Гц з'являються додаткові максимуми і спостерігається збільшення коефіцієнтів підсилення в усіх максимумах характеристики. У табл. 3 наведено числові значення максимумів АЧХ, поданих на рис. 14.

Таблиця 3. Числові значення АЧХ представлених на рис. 14

Номер максимуму АЧХ	Використання $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ з урахуванням літологічного складу та фізико-механічних властивостей кожного із шарів		Використання $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ з епістемічними похибками в літологічному складі та фізико-механічних властивостей шарів	
	Частота, Гц	Коефіцієнт підсилення	Частота, Гц	Коефіцієнт підсилення
1	0,44	7,01358	0,56	11,37226
2	1,32	5,20448	1,2	9,7236
3	—	—	3,58	2,58074

Із таблиці випливає таке. Якщо апроксимація шарів моделі ґрунтової товщі відповідними залежностями  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  здійснювалася з епістемічними похибками в літологічному складі та фізико-механічних властивостей ґрунтових шарів, то розрахунок АЧХ може призвести до результатів із суттєвими похибками, а саме:

- до появи більшої кількості максимумів АЧХ (частина з яких будуть хибними);
- до неконтрольованого зміщення максимумів АЧХ як у бік нижчих, так і у бік вищих частот;
- до значної зміни значень відносного підсилення коливань.

Дослідження впливу епістемічних похибок, які містяться в залежностях  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , одержаних без використання вдосконаленої апаратурно-методичної бази, наприклад [34], та з використанням аналогічних уточнених залежностей з роботи [29], приводять до результатів, показаних на рис. 15. При розрахунку АЧХ використовувалася модель ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30 в м. Києві. Розрахунок виконано з використанням еквівалентного лінійного моделювання за допомогою програмного продукту PROSHAKE.

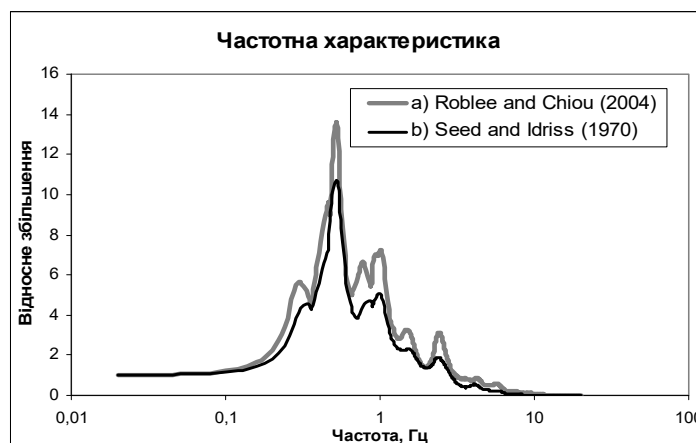


Рис. 15. АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30 в м. Києві, розраховані з урахуванням нелінійних властивостей для шарів ґрунту, складених пісками за даними: а) [29]; б) [34]

З рис. 15 видно, що при використанні залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , отриманих у результаті досліджень деформаційних характеристик ґрунтів у 2000-х рр., порівняно із залежностями, отриманими в 1970-х рр., видно незначне збільшення ширини частотної області АЧХ, на якій спостерігається підсилення сейсмічних коливань ґрунту, і чіткіше виявляються його максимуми. Зміщення частот максимумів при цьому не спостерігається. Таким чином, можна сформулювати такі висновки.

- При використанні застарілих числових залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , можна недооцінити частотний діапазон резонуючого підсилення сейсмічних коливань.

- Залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , отримані за результатами лабораторних і польових досліджень з використанням недосконалої апаратурно-методичної бази, потребують уточнення інформації про основні параметри, які визначають характер залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації: число пластичності для глинистих порід, розмір частинок та їхній відсотковий вміст для піщаних порід.

**Висновки.** У статті представлено результати збирання, аналізу і систематизації матеріалів лабораторних і польових досліджень деформаційних характеристик ґрунтів, одержаних дослідниками Японії та США. В умовах значних сейсмічних навантажень деформаційні характеристики ґрунту стають нелінійними. Ця властивість ґрунтів виражається через модуль зсуву  $G$  і коефіцієнт поглинання  $D$ , величини яких можуть суттєво змінюватися залежно від величини деформації зсуву  $\gamma$ . При еквівалентному лінійному і нелінійному моделюванні реакції ґрунту на сейсмічні впливи необхідно в розрахункових сейсмогеологічних моделях ґрунтової товщі задавати для кожного шару додаткові параметри, які характеризують нелінійні властивості ґрунтів, а саме залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ . Отримати в лабораторних або польових умовах такі залежності для кожного шару ґрунту верхньої частини розрізу під будівельним майданчиком в умовах України практично неможливо. У зв'язку з цим необхідно використовувати фондові й опубліковані матеріали, одержані зарубіжними авторами.

Результати детального вивчення матеріалів досліджень зміни значень динамічних параметрів ґрунтів при деформаціях різної величини узагальнено в базі даних про залежності  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків, розташованих на території України. На її базі:

- досліджено вплив літологічного складу та фізико-механічних параметрів ґрунту на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання;
- виділено основні параметри, за якими можна ефективно апроксимувати нелінійні властивості кожного із шарів моделі ґрунтової товщі відповідними залежностями  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ : для глинистих порід – це індекс пластичності  $PL$  та глибина залягання; для піщаних порід – розмір частинок, їхній відсотковий вміст і глибина залягання;
- можливо на рівні сучасних знань урахувати нелінійні властивості ґрунтів при математичному моделюванні їхньої реакції на сейсмічні впливи;
- досліджено вплив епістемічних похибок, які можуть виникнути при виборі залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для ґрунтових шарів розрахункової сейсмогеологічної моделі, на параметри її частотної характеристики, обчислюваної з використанням програмного продукту PROSHAKE для еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

Методологічний підхід до формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі шляхом введення залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , які відображають не-

лінійні властивості ґрунту, дозволяє максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних, що значно підвищить обґрунтованість і точність визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних та експлуатаційних майданчиках. Зазначені дані необхідні для розробки ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проєктованих і наявних об'єктів.

#### Список використаних джерел

1. Вознесенский Е. А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах / Е. А. Вознесенский, Е. С. Кушнарева, В. В. Фуникова. – М.: Флинта, 2014. – 104 с.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях : пер. с англ. / К. Ишихара. – СПб.: НПО "Геореконструкция-Фундаментпроект", 2006. – 383 с.
3. Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України) / О. В. Кендзера // Вісн. НАН України. – 2015. – № 2. – С. 44–57. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu\\_2015\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2015_2_10).
4. Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні / О. В. Кендзера // Укр. географ. журн. – 2015. – № 3. – С. 9–15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>.
5. Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах / О. К. Кондратьев. – М.: Недра, 1986. – 176 с.
6. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan / T. Iwasaki, F. Tatsuoka, K. Tokida, S. Yasuda // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, San Francisco, California. – 1978. – № 2. – P. 885–896.
7. Anderson D.G. Effect of straining on shear modulus of clays / D. G. Anderson, F. E. Richart // Geotechnical Engineering Division, ASCE. – 1976. – № 102. – P. 975–987.
8. Andreasson B. A. Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions / B. A. Andreasson // Doctoral Thesis. Dept. of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg. – 1979. – 242 p.
9. Andreasson B. A. Dynamic Deformation Characteristics of a Soft Clay / B. A. Andreasson // International Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri. – 1981. – P. 65–70.
10. Bardet J. P. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits / J. P. Bardet, T. Tobita. – Los Angeles: Univ. of Southern California, 2001. – 44 p.
11. Bardet J. P. EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits / J. P. Bardet, K. Ichii, C. H. Lin – Los Angeles: Univ. of Southern California, Department of Civil Engineering. – 2000. – 40 p.
12. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. / K. H. Stokoe, M. B. Darendeli, R. B. Gilbert, F.-Y. Menq, W.-K. Choi // Proc. NSF/PEER Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, Univ. of California at Berkeley. – Berkeley, California. – 2004. <http://peer.berkeley.edu/lifelines/Workshop304>.
13. Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils: report / Univ. of California at Berkeley; J. I. Sun, R. Golekorkhi, H. B. Seed. – № UCB/EERC-88/15. – Berkeley, California, 1988.
14. Guidelines for determining design basis ground motions. V. 1 : Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America: report / EPRI, Electrical Power Research Institute. – № EPRI TR-102293. – Palo Alto, CA., 1993.
15. Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis. / R.D. Andrus, J. Zhang, B.S. Ellis, C.H. Juang. – South Carolina Department of Transportation, Columbia, SC, 2003. – FHWA-SC-03-07. – 141 p.
16. Hardin B. O. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves / B. O. Hardin, V. P. Drnevich // Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. – 1972. – ASCE 98(SM7) – P. 667–692.
17. Hashash Y. DeepSoil User Manual and Tutorial. / Y. Hashash. – Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2012. – 107 p.
18. Idriss I. M. An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential. / I. M. Idriss // Proc. of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Federal Highway Administration, Washington DC, 10 January 1999. – 1999.
19. Isenhower W. M. Strain Rate Dependent Shear Modulus of San Francisco Bay Mud / W. M. Isenhower, K. H. Stokoe // Proc. of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics, University of Missouri-Rolla. – 1981. – № 2. – P. 597–602.
20. Ishibashi I. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay / I. Ishibashi, X. J. Zhang // Soils Found. – 1993. – № 33(1). – P. 182–191.

21. Iwasaki T. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading / T. Iwasaki, F. Tatsuoka, Y. Takagi // *Soils Found.* – 1978. – № 18(1). – P. 39–56.
22. Kendzera O. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine / O. Kendzera // In: Earth reality along the silk road and scientific cooperation. Atatürk Üniversitesi: ERZURUM. – 2015. – P. 61–72.
23. Kim T. C. Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario / T. C. Kim, M. Novak // *Canadian Geotechnical Journal.* – 1981. – № 18(3). – P. 371–389.
24. Kokusho T. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range / T. Kokusho // *Soils Found.* – 1980. – № 20. – P. 45–60.
25. Kokusho T. Dynamic properties of soft clay for wide strain range / T. Kokusho, Y. Yoshida, Y. Esashi // *Soils Found.* – 1982. – № 22(4). – P. 1–18.
26. Kovacs W. D. Dynamic moduli and damping ratios for a soft clay / W. D. Kovacs, H. B. Seed, C. K. Chan // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE.* – 1971. – № 97(SM1). – P. 59–75.
27. Kramer S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering* / S. L. Kramer. – N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River. – 1996. – 672 p.
28. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. – Washington, USA. – 1998. – 54 p.
29. Roblee C. A proposed geotindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses / C. Roblee, B. Chiou // *Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, University of California, Berkeley, California.* – 2004.
30. Sagaseta C. Cyclic loading. / C. Sagaseta, V. Cuellar, M. Pastor // *Proc. of the tenth European conference on soil mechanics and foundation engineering.* – 1991. – № 3. – P. 981–990.
31. Seed H. B. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes / H. B. Seed, I. M. Idriss. – *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.* – 1982.
32. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites: report / *Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California; P. B. Schnabel, J. Lysmer, H. B. Seed.* – № EERC 72-12. – Berkeley, California, 1972. – 102 p.
33. Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range / G. Lanzo, A. Pagliaroli, P. Tommasi, F. L. Chiocci // *Canadian Geotech. J.* – 2009. – № 46(11). – P. 1277–1288.
34. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis: report / *Earthquake Engineering Research Center, University of California; H. B. Seed, I. M. Idriss* – № UCB/EERC/70/10. – Berkeley, California, 1970. – 48 p.
35. Studer J. Investigation on Cyclic Stress-Strain Characteristics of Gravel Material / J. Studer, N. Zingg, E. G. Prater // *Proc. of the seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey.* – 1980. – № 3. – P. 355–362.
36. Study on the mechanical properties of gravel-Dynamic properties of reconstituted sample: report / *Central Research Institute of Electric Power Industry; Y. Tanaka, K. Kudo, Y. Yoshida, M. Ikemi.* – № U87019. – 1987.
37. Tatsuoka F. Hysteretic damping of sands and its relation to shear modulus / F. Tatsuoka, T. Iwasaki, Y. Takagi // *Soils Found.* – 1978. – № 18. – P. 25–40.
38. Taylor P. W. Dynamic torsion testing of soils. / P. W. Taylor, I. M. Parton // *Proc. of the 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.* – 1973. – P. 425–432.
39. Vucetic M. Cyclic Characterization for Seismic Regions Based on PI. / M. Vucetic // *Proc. of the 13th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India.* – 1994a. – № 1. – P. 329–332.
40. Vucetic M. Effect of soil plasticity on cyclic response / M. Vucetic, R. Dobry // *Journal of Geotechnical engineering.* – 1991. – № 117. – P. 89–107.
41. Vucetic M. Cyclic Threshold Shear Strains in Soils / M. Vucetic // *Journal of Geotechnical engineering* – 1994b. – № 120. – P. 2208–2228.
42. Wang Y. H. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties / Y. H. Wang, W. K. Siu // *Canadian Geotechnical Journal.* – 2006. – № 43(6). – P. 601–618.
43. Yoshida N. Nonlinear site response and its evaluation and prediction In. / N. Yoshida, S. Iai // *The effects of Surface Geology on Seismic Motion. Balkema, Rotterdam.* – 1998. – P. 71–90.
44. Zen K. Laboratory tests and in situ seismic survey on vibratory shear modulus of clayey soils with various plasticities / K. Zen, Y. Umehara, K. Hamada // *Proc. of the 5th Japanese Earthquake Engineering Symp., Japan.* – 1978. – P. 721–728.
45. Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan: *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application.* San Francisco, California, 2, 885–896.
46. Anderson, D. G., Richart, F. E. (1976). Effect of straining on shear modulus of clays. *J. Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, 102(GT9), 975–987.
47. Andreasson, B. A. (1979). Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions. Doctoral Thesis. Dept. of Geotechnical Engineering. Chalmers University of Technology. Gothenburg, 242 p.
48. Andreasson, B.A. (1981). Dynamic Deformation Characteristics of a Soft Clay. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.* St. Louis, Missouri, 1, 65–70.
49. Bardet, J. P., Tobita, T. (2001). NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California, 44 p.
50. Bardet, J. P., Ichii, K., Lin, C. H. (2000). EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
51. Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Gilbert, R. B., Menq, F.-Y., Choi, W.-K. (2004). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves: Proc. NSF/PEER Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response. Univ. of California at Berkeley. Berkeley, California. <http://peer.berkeley.edu/lifelines/Workshop304>
52. Sun, J. I., Golekorkhi, R., Seed, H. B. (1988). Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Report No. UCB/EERC-88/15. Univ. of California at Berkeley. Berkeley, California.
53. Electrical Power Research Institute, EPRI. (1993). Guidelines for determining design basis ground motions. Vol. 1: Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America., Report No. EPRI TR-102293. Palo Alto, California.
54. Andrus, R. D., Zhang, J., Ellis, B. S., Juang, C. H. (2003). Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis. FHWA/SC-03-07. South Carolina Department of Transportation. Columbia, SC, 141 p.
55. Hardin, B. O., Drnevich, V. P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division.* ASCE 98(SM7), 667–692.
56. Hashash, Y. (2012). DeepSoil User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 107 p.
57. Idriss, I. M. (1999). An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential: Proc. of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction. Federal Highway Administration. Washington DC, 10 January 1999.
58. Isenhower, W. M., Stokoe K. H. (1981). Strain Rate Dependent Shear Modulus of San Francisco Bay Mud. *Proc. of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics.* University of Missouri-Rolla, 2, 597–602.
59. Ishibashi, I., Zhang, X.J. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found.*, 33(1), 182–191.
60. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Takagi, Y. (1978). Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils Found.*, 18(1), 39–56.
61. Kendzera, O. (2015). Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. In: Earth reality along the silk road and scientific cooperation. Atatürk Üniversitesi: ERZURUM, 61–72.
62. Kim, T.C., Novak, M. (1981). Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario. *Canadian Geotech. J.*, 18(3), 371–389.
63. Kokusho, T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. *Soils Found.*, 20, 45–60.
64. Kokusho, T., Yoshida, Y., Esashi, Y. (1982). Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils Found.*, 22(4), 1–18.
65. Kovacs, W. D., Seed, H. B., Chan, C. K. (1971). Dynamic moduli and damping ratios for a soft clay. *ASCE J. Soil Mech. Found. Div.*, 97(SM1), 59–75.
66. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.* N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
67. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems. (1998). Washington, USA, 54 p.
68. Roblee, C., Chiou, B. (2004). A proposed geotindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response. University of California, Berkeley, California.
69. Sagaseta, C., Cuellar, V., Pastor, M. (1991). Cyclic loading: Proc. of the tenth European conference on soil mechanics and foundation engineering, 3, 981–990.
70. Seed, H. B., Idriss, I. M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Monograph. Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California.
71. Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
72. Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P., Chiocci, F. L. (2009). Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range. *Canadian Geotech.*, 46(11), 1277–1288.

## References

1. Voznesenskiy, E. A. Kushnareva, E. S., Funikova, V. V. (2014). Nature and the laws of stress wave attenuation in soils. M.: Flinta, 104 p. [in Russian].
2. Ishikihara, K. (2006). The behavior of soils during earthquakes. St. Petersburg: NPO "Georekonstruktsiya-Fundamentproekt", 383 p. [in Russian].
3. Kendzera, O. V. (2015). Seismic hazard assessment and protection against earthquakes. Practical applications of developments of Subotnik Institute of Geophysics of NAS of Ukraine. *Bulletin of NAS of Ukraine*, 2, 44–57. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu\\_2015\\_2\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2015_2_10). [in Ukrainian].
4. Kendzera, O. V. (2015). Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. *Ukrayins'kyi heohrafichnyy zhurnal*, 3, 9–15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>. [in Ukrainian].
5. Kondratiev, O. K. (1986). Seismic wave in absorbing media. Moscow: Nedra, 176 p. [in Russian].

34. Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report № UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 48 p.
35. Studer, J., Zingg, N., Prater, E. G. (1980). Investigation on Cyclic Stress-Strain Characteristics of Gravel Material: *Proc. of the seventh World Conference on Earthquake Engineering*. Istanbul, Turkey, 3, 355–362.
36. Tanaka, Y., Kudo, K., Yoshida, Y., Ikemi, M. (1987). A study on the mechanical properties of gravel-Dynamic properties of reconstituted sample. Central Research Institute of Electric Power Industry, Report U87019.
37. Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Takagi, Y. (1978). Hysteretic damping of sands and its relation to shear modulus. *Soils Found*, 18, 25–40.
38. Taylor, P. W., Parton, I. M. (1973). Dynamic torsion testing of soils. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 425–432.
39. Vucetic, M. (1994a). Cyclic Characterization for Seismic Regions Based on PL. *Proc. of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi, India, 1, 329–332.

40. Vucetic, M. (1994b). Cyclic Threshold Shear Strains in Soils. *J. Geotech. Eng.*, 120, 2208–2228.
41. Vucetic, M., Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.*, 117, 89–107.
42. Wang, Y. H., Siu, W. K. (2006). Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties. *Can. Geotech. J.*, 43(6), 601–618.
43. Yoshida, N., Iai, S. (1998). Nonlinear site response and its evaluation and prediction. In: *The effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Balkema, Rotterdam, 71–90.
44. Zen, K., Umehara, Y., Hamada, K. (1978). Laboratory tests and in situ seismic survey on vibratory shear modulus of clayey soils with various plasticities. *Proc. of the 5th Japanese Earthquake Engineering Symp. Japan*, 721–728.

Надійшла до редколегії 23.05.17

A. Kendzera, Cand. Sci. (Phys.-Math.),  
Corresponding member of NAS of Ukraine, Deputy Director  
E-mail: kendzera@igph.kiev.ua,  
Yu. Semenova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research fellow  
E-mail: ulaska@ukr.net  
Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine  
32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

## DEFORMATION CHARACTERISTICS OF COMPUTATIONAL MODELS OF SOIL STRATA

*The method for determining of the deformation characteristics of the layers of computational models of soil strata for an equivalent linear and nonlinear modeling of soil response to seismic effects is considered in the article. The results of data collection, analysis and systematization of the results obtained in Japan and the USA laboratory and field studies of deformation characteristics of soils are presented. On this basis the database including the dependences of shear modulus ( $G$ ) and damping ratios ( $D$ ) on the strain level ( $\gamma$ ) for different types of soils typical for sites located in the Ukraine was created. The results of the study of the factors influencing the  $G(\gamma)$  and  $D(\gamma)$  dependencies are analyzed. Based on the results of the analysis, the main parameters are identified that control the shape of the graphs of the indicated dependencies and allow to quickly determining with appropriate accuracy of the corresponding dependencies for each layer of the models of soil strata from the generated database. These are a plasticity index  $PL$  and a depth of occurrence of the clays and the particle size, their percentage and depth for sand. The paper presents the results of the investigation of the influence of epistemic errors that arise when selecting the dependences  $G(\gamma)$  and  $D(\gamma)$  for the ground layers of the design seismogeological model on the parameters of its amplitude-frequency characteristic, calculated by using the equivalent linear modeling of the soil response caused by earthquakes. The calculations were performed by using PROSHAKE software. It is found that the errors in determining of the deformation characteristics of ground layers in the calculation model lead to a shift in the maxima of the frequency response in the frequency domain, to a change in the amplification coefficients of the vibrations and to the appearance of "false" maxima at high frequencies.*

*The database of  $G(\gamma)$  and  $D(\gamma)$  customized by the authors for different types of soils typical for sites located in Ukraine makes it possible to apply methods for modeling of the soil strata reaction caused by seismic impacts with taking into account the nonlinear behavior of soil response. The developed methodology for the formation of computed seismogeological models of the soil strata, by introducing the dependences  $G(\gamma)$  and  $D(\gamma)$ , which reflect the nonlinear properties of soils, allows (at the level of modern knowledge) to approximate the calculated frequency characteristics of the soil to the real. As a result, the validity and accuracy of the determination of the quantitative parameters of the seismic hazard on the investigated construction and operational sites are increased, which is necessary for the development of effective measures for the seismic stability maintenance of the designed and existing facilities.*

**Keywords:** soils, soil models, modeling of seismic oscillations, elastic and inelastic characteristics of the soil, epistemic and random errors, seismic impacts.

A. Кендзера, канд. физ.-мат. наук,  
чл.-кор. НАН Украины, зам. директора  
E-mail: kendzera@igph.kiev.ua,  
Ю. Семенова, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.  
E-mail: ulaska@ukr.net  
Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины  
Пр. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВОЙ ТОЛЩИ

*Рассмотрена методика определения деформационных характеристик слоев расчетных моделей грунтовой толщи, необходимых для эквивалентного линейного и нелинейного моделирования ее реакции на сейсмические воздействия. Представлены результаты сбора, анализа и систематизации результатов лабораторных и полевых исследований деформационных характеристик грунтов, полученных в Японии и США. На этой основе создана база зависимостей (от величины сдвиговой деформации  $\gamma$ ) модуля сдвига  $G(\gamma)$  и коэффициента поглощения  $D(\gamma)$  для различных типов грунтов, характерных для строительных площадок на территории Украины. Проанализированы результаты исследования факторов, влияющих на зависимости  $G(\gamma)$  и  $D(\gamma)$ . По результатам анализа выделены основные параметры, которые контролируют форму графиков указанных зависимостей и позволяют быстро с допустимой точностью подобрать для каждого слоя модели грунтовой толщи соответствующие зависимости из сформированной базы данных. Для глинистых пород – это индекс пластичности  $PL$  и глубина залегания; для песчаных пород – размер частиц, их процентное содержание и глубина залегания. Представлены результаты исследования влияния эпистемических ошибок, которые возникают при выборе зависимостей  $G(\gamma)$  и  $D(\gamma)$  для грунтовых слоев расчетной модели сейсмогеологической модели, на параметры ее амплитудно-частотной характеристики, рассчитанной с использованием эквивалентного линейного моделирования колебаний грунта при землетрясениях. Расчеты выполнены с использованием программного продукта PROSHAKE. Установлено, что погрешности при определении деформационных характеристик грунтовых слоев в расчетной модели приводят к смещению максимумов АЧХ в частотной области, к изменению коэффициентов усиления колебаний, а также к появлению "ложных" максимумов на высоких частотах.*

*Созданная авторами база данных  $G(\gamma)$  и  $D(\gamma)$  для различных типов грунтов, характерных для площадок на территории Украины, позволяет применять методы моделирования реакции грунтовой толщи на сейсмические воздействия с учетом нелинейного поведения грунтов. Разработанная методика формирования расчетных сейсмогеологических моделей грунтовой толщи позволяет (на уровне современных знаний) путем введения зависимостей  $G(\gamma)$  и  $D(\gamma)$ , которые отражают нелинейные свойства грунтов, максимально приблизить рассчитанные частотные характеристики грунтовой толщи к реальным. В результате повышается обоснованность и точность определения количественных параметров сейсмической опасности для исследуемых строительных и эксплуатационных площадок, что необходимо для разработки эффективных мероприятий по обеспечению сейсмостойкости проектируемых и существующих объектов.*

**Ключевые слова:** грунты, модели грунтов, моделирование сейсмических колебаний, упругие и неупругие характеристики грунта, эпистемические и случайные ошибки, сейсмические воздействия.