

ЗАВДАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОДОНАСИЧЕНИХ ПІСКІВ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВАХ

Розглянуто особливості експериментальних досліджень водонасичених пісків при динамічних впливах. Розроблено дослідницьку установку випробування ґрунту на основі вібростенда та компресійного приладу КПр-1м.

Ключові слова: віброкомпресія, водонасичені піски, вібростенд, випробування.

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСКОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассмотрены особенности экспериментальных исследований водонасыщенных песков при динамических воздействиях. Разработана исследовательская установка испытания ґрунта на основе вибростенда и компрессионного прибора КПр-1м.

Ключевые слова: виброкомпрессия, водонасыщенные пески, вибростенд, испытания.

TASKS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF SATURATED SANDS UNDER DYNAMIC IMPACTS

Peculiarities of the experimental researches of water-saturated sands under dynamic impacts are considered. Developed research installation for testing of soil, based on the shaker table and a compression device CR_C-1m.

Keywords: vibrocompression, water-saturated sands, shaking table, testing.

Вступ.

Дослідження динамічних властивостей водонасичених пісків мають вагомий практичний значення в умовах постійного підвищення інтенсивності техногенного вібраційного впливу на геологічне середовище, будівництв у всьому світі в різних районах і за інших особливих умов, а також при виборі методик досліджень для будь-яких споруд, що працюють в умовах динамічних впливів.

При статичному навантаженні пухкі піски досить міцні й малостискувані. З точки зору динамічних властивостей пісків під пухкими необхідно розуміти піски з відносною щільністю до 45% [1], оскільки при більших її значеннях ґрунт, як правило, не здатний до динамічного розрідження. Під щільними розуміємо піски з відносною щільністю, більшою 70% [2, 3]. Таким чином, піски середньої щільності характеризуються величиною в діапазоні 45–70%. Піски при дії статичного навантаження деформуються за рахунок більш щільного укладання, взаємного перепакування сусідніх часток. Величина деформацій піску в першу чергу

залежить від його щільності. Для пісків середньої щільності й щільних деформації при статичному навантаженні мають незначні величини. Кардинально змінюється процес деформування пісків навіть при короткочасній дії динамічного навантаження. Перепакування частинок і зменшення пористості пісків при цьому більш значні, й величини деформацій набагато більші. Структура пухких пісків порівняно легко порушується при динамічних впливах, здатних викликати ущільнення піску, істотні додаткові осідання споруд, а іноді втрату стійкості їх основ.

Характерними формами реакції пісків на динамічні навантаження є такі:

- 1) віброповзучість та віброкомпресія;
- 2) розрідження водонасиченого піску, пов'язане зі швидким підвищенням порового тиску на фоні ущільнення ґрунту аж до зникнення ефективних напружень;
- 3) зниження несучої здатності ґрунту може проявлятися менш контрастно: при обмежених зсувних деформаціях це проявляється в стані так званої «циклічної рухливості» і є характерним для щільних пісків, які мобілізують значний опір динамічному навантаженню навіть при нульовому ефективному напруженні;
- 4) розущільнення (додатна дилатансія) маловологих щільних пісків, що супроводжується зниженням їх міцності.

Особливі деформаційні та міцнісні властивості основ, складених водонасиченими пісками, повинні обов'язково бути враховані при проектуванні будівель і споруд, що працюють в умовах динамічних впливів, особливо довготривалих техногенних навантажень невеликої інтенсивності.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Вивченням питань дослідження динамічних властивостей ґрунтів займалися М.М. Герсеванов, В.А. Флорін, Н.Н. Маслов, П.Л. Іванов, І.В. Дудлер, Ю.М. Абелєв, В.І. Осіпов, В.Д. Казарновський, Е.А. Вознесенський, О.В. Аслибекян, Г. Сід, А. Казагранде, Г. Кастро, І. Ідріс, К. Ішихара та багато інших дослідників. У більшості робіт основну увагу приділено дослідженню особливостей поведінки ґрунту безпосередньо при втраті динамічної стійкості. Для інженерної практики велике значення має визначення умов, за яких відбувається втрата динамічної стійкості ґрунтів, і в першу чергу прогнозування додаткових деформацій основи та її взаємодії зі спорудою.

Узагальнюючи результати аналітичних і експериментальних досліджень, можна виділити три групи факторів, що визначають можливість динамічного розрідження ґрунтів [2, 4]:

- 1) параметри динамічного впливу:
 - енергія динамічного впливу;
 - тривалість впливу (кількість циклів);
 - спектральний склад сейсмічних хвиль;
 - ступінь асиметрії циклу навантаження;

2) склад, будова і стан ґрунту:

- коефіцієнт водонасичення;
- коефіцієнт бічного тиску ґрунту;
- величина ефективних напружень;
- щільність;
- водопроникність;
- розмір, форма та морфологія поверхні зерен;
- величина зчеплення;
- тип структури та мікробудова;
- ступінь переущільнення;
- фізико-хімічна активність;

3) особливості будови масиву ґрунту:

- глибина залягання шарів ґрунту;
- потужність шару потенційно нестійкого ґрунту;
- положення джерела можливого розрідження відносно схилу;
- наявність підстилаючих жорстких шарів;
- наявність перекриваючих слабопроникних шарів.

Таким чином, виконаний аналіз експериментальних та теоретичних досліджень дозволяє виділити такі закономірності поведінки пісків при динамічних впливах:

1. При рівних інших умовах важливе значення для динамічної стійкості водонасичених пісків має розмір зерен переважаючої фракції та вміст пилювато-глинистих частинок. Другорядну роль відіграють обкачуваність зерен і наявність поверхневих плівок, а вплив неоднорідності гранулометричного складу пісків не є закономірним.

2. Найбільше до ущільнення схильні піски у водонасиченому стані, а найменше – при вологості капілярної вологоємності.

3. Значний вплив на поведінку всіх пісків чинить коефіцієнт асиметрії циклу динамічного навантаження. Для кожного піску існує своє критичне значення коефіцієнта асиметрії циклу, при зменшенні котрого відносно його критичного значення, в тому числі й у сфері від'ємних величин, спостерігається різке зниження динамічної стійкості водонасичених пісків, пов'язане зі зміною напрямку дотичних напружень [2].

4. Довготривалі пульсуючі навантаження, особливо при невеликих амплітудах деформації, не дозволяють щільному водонасиченому піску мобілізувати значний опір зсуву і призводять до повільного переупакування зерен та стрімкого розрідження ґрунту, що починається в межах послаблених зон. З практичної точки зору це важливо при вивченні реакції пісків в умовах довготривалих техногенних навантажень невеликої інтенсивності [2].

5. Підвищення амплітуди напружень призводить до зниження динамічної стійкості та збільшення швидкості деформування пісків різної крупності та щільності складу. Ця залежність може бути описана для будь-

якого піску. При цьому існує два різних діапазони значень амплітуди, при котрих змінюється тип цієї залежності – з лінійної на експоненціальну. Граничні значення амплітуди напружень, при яких відбувається зміна типу залежності, визначаються крупністю та щільністю пісків [4].

6. Пісок стає нерозріджуваним у будь-яких умовах лише при дуже високій щільності – більше 70–80%. Піски з меншою відносною щільністю можуть розріджуватися при довготривалих динамічних навантаженнях з коефіцієнтом асиметрії циклу, близьким до нуля. Ця форма реакції пов'язана з формуванням зон дилатансії. Таким чином, з точки зору динаміки ґрунтів до щільних пісків варто відносити $D_r \geq 70\%$, а до пісків середньої щільності $D_r = 45 - 70\%$ [2].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Актуальність теми обумовлена дискусійністю і недостатньою вивченістю багатьох питань динамічної стійкості ґрунтів, незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, а саме:

– не може вважатися повністю розв'язаною проблема адекватного моделювання поведінки ґрунтів при динамічних впливах. Подальша робота повинна бути направлена на вдосконалення та деталізацію математичних і експериментальних моделей середовища, експериментальних методів дослідження та методів розв'язання задач з розрахунків основ;

– інформація про дослідження динамічних властивостей ґрунтів у діючих нормативних документах має здебільшого довідковий і рекомендаційний характер. Детальніше це питання розкрито в будівельних правилах Російської Федерації [5, 6], де наведено загальні вимоги щодо вибору типу випробувальної установки та процесу випробувань;

– не забезпечені відповідною нормативною базою методики визначення динамічних властивостей ґрунтів.

Мета роботи – розробка дослідної установки для кількісного оцінювання поведінки водонасичених пісків під дією динамічних навантажень.

Основний матеріал та результати. Лабораторні методи випробування ґрунтів при дії динамічних навантажень переважно засновані на використанні відомих методів статичних випробувань з додаванням динамічних впливів. Динамічні впливи створюються зазвичай двома шляхами:

1) встановленням приладів на вібраційні столи чи сейсмічні платформи;

2) підключенням до системи статичного навантаження приставок, що створюють додаткові динамічні навантаження.

Динамічні впливи на столи та платформи створюються механічними й пневматичними вібраторами, ударами вантажів, гідравлічними пульсаторами та ін. На деяких платформах можливе створення динамічних впливів у всіх

трьох напрямках (трикомпонентні платформи), але частіше створюються впливи одного напрямку – вертикальні чи горизонтальні.

Можна виділити такі методи лабораторних динамічних досліджень ґрунтів: тривісний стиск; простий зсув; компресійний стиск; малоамплітудні динамічні випробування на резонансних колонках; крутильний зсув; кільцевий зсув; випробування на вібростендах; ударні випробування; лабораторні акустичні методи.

До лабораторних методів дослідження фізичних моделей належать випробування на вібростолах та геотехнічних центрифугах.

Аналізуючи особливості лабораторних методів динамічних випробувань ґрунтів, варто зупинитися на деяких позиціях:

1. Усі методи засновані на збудженні в зразку ґрунту хвиль напружень різного типу – поздовжніх або (частіше) поперечних, і в цьому полягає їх перша, й основна, відмінність.

2. Існуючі методи мають різні можливості в діапазоні амплітуд деформацій зсуву. Цими можливостями і варто керуватися у першу чергу при виборі методу випробувань, адекватного поставленій задачі.

3. Ефекти повзучості й релаксації напружень обов'язково проявляються тією чи іншою мірою залежно від швидкості деформації. Реологічні ефекти можуть виражатися, наприклад, у підвищенні порового тиску при неможливості об'ємних деформацій. Деякі автори вважали за необхідне проведення паралельних випробувань повзучості для розмежування реологічних ефектів і динамічних [2].

4. При виборі методу для динамічних випробувань, крім його адекватності поставленій задачі, варто брати до уваги: а) точність методу; б) граничні ефекти, в) спосіб підготовки зразків.

Дослідницька установка повинна забезпечити можливість розв'язання основної задачі, а саме – визначити закономірності поведінки основ з водонасичених пісків при динамічних впливах та на основі отриманих експериментальним шляхом даних розробити методику для розрахунку основ з урахуванням їх динамічних властивостей.

При виборі типу установки для випробувань до уваги було взято багато факторів, зокрема такі:

- доцільність використання цієї установки, відповідність можливостей установки поставленим задачам;
- вартість створення або закупівлі установки;
- масштабність випробовуваних моделей (зразків) ґрунту;
- можливість моделювання динамічних впливів різних напрямків і форм.

З урахуванням вищенаведеного й на основі виконаного аналізу методів випробувань та випробувальних установок було прийняте рішення розробити

установку випробування ґрунту в умовах неможливості бокового розширення з розміщенням компресійного приладу на вібростенді.

Вібростенди – це прилади, призначені для визначення тих чи інших параметрів міцнісних і деформаційних властивостей ґрунту при одночасному збудженні в ньому хвиль напружень. Таким чином, вони складаються з двох основних частин: вібратора направленої дії (переважно вертикальної) та системи вимірювання показників фізико-механічних властивостей.

До вібростендів належать прилади, які в науково-технічній літературі називаються по-різному: віброзсувні установки, вібропенетрометри, віброкомпресійні прилади тощо. У цьому випадку установка вібростенда є універсальною, тому що передбачена можливість монтажу різних приладів статичних досліджень ґрунтів (наприклад, прилад компресійного стиску, прилад простого зсуву і т.п.)

Серед особливостей розподілу напружень у зразку ґрунту при використанні цього методу випробувань можна назвати такі: а) динамічні напруження змінюються по висоті; б) при високих значеннях віброприскорення ґрунт піддається розтягу у фазі підйому зразка, що повинно призводити до особливо помітних руйнувань його структури та зниження міцності; в) напруження в лабораторних зразках висотою в декілька сантиметрів незначні навіть при великих значеннях віброприскорення.

Динамічна нестійкість ґрунтів за результатами вібростендових випробувань характеризується на основі порівняння отриманих показників фізико-механічних властивостей для статичних умов з їх динамічними величинами після передачі вібрації з певними параметрами. При цьому динамічні величини, що цікавлять дослідника, визначаються або в процесі вібрації, або після неї, що обмежує застосування метода, якщо мова йде, наприклад, про розрідження водонасичених пісків.

При побудові установки вібростенда враховано такі основні вимоги:

1. Забезпечити максимальну свободу руху плити вібростенда. Для моделювання реального динамічного впливу на ґрунт необхідно забезпечити одночасне прикладання навантажень у горизонтальному, вертикальному напрямках або при їх комбінаціях.

2. Робочі діапазони прискорення, частоти та амплітуди установки повинні відповідати параметрам динамічних навантажень, на які передбачається виконувати експеримент.

3. Ефективна система управління має забезпечити контроль над основними параметрами випробування. Важливою є можливість зміни параметрів динамічного навантаження у процесі експерименту.

4. Застосовувати високопродуктивні системи вимірювання, що включає необхідну кількість точок вимірювання й систему збору даних.

5. Убезпечити людей при використанні установки та її компонентів.

Основними компонентами вібростенда є такі (рис. 1):

- 1 – основна рама вібростенда, оснащена засобами фіксації випробувального приладу;
- 2 – електромеханічні вібратори (збудник коливань);
- 3 – система контролю й управління (перетворювач частот, віброметрична апаратура);
- 4 – система вимірювання та збору даних (датчики вимірювального приладу, віброметрична апаратура);
- 5 – електричне живлення системи.

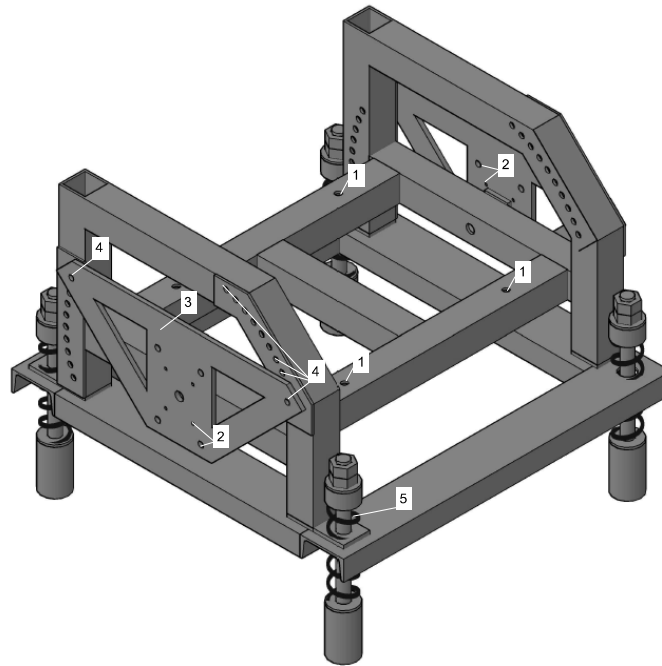


Рис. 1. Модель розробленої конструкції вібростенда: 1 – місце фіксації випробувального приладу; 2 – місця фіксації електромеханічних вібраторів; 3 – поворотна платформа для фіксації вібраторів та встановлення необхідного кута їх нахилу; 4 – точки фіксації поворотної платформи під необхідним кутом; 5 – пружинні опори вібростенда

Вібростенд зафіксований жорстко в бетонній підлозі з використанням встановлювальних гвинтів. Робоча поверхня не повинна відхилятися від горизонталі більше ніж на 1 мм/м [7]. Габарити установки в плані прийняті 750×750 мм; висота – 450 мм.

Вібростенд оснащений поворотними пластинами, які служать водночас для кріплення вібраторів та встановлення необхідного кута їх нахилу від 0 до 45°. Таким чином передбачається виконувати експериментальні дослідження при вібраціях у вертикальному напрямку та при коливаннях відхиленні від вертикалі на величину від 5 до 45° з кроком 5°.

Для отримання направлених коливань вібростенд оснащується парою однакових вібраторів із зустрічними напрямками обертання. Використаний електричний вібратор, що створює вібрацію за рахунок обертання дебалансів, установлених на осі електродвигуна. Вібрація відбувається

перпендикулярно осі обертання і по дотичній площадці кріплення вібратора. Саме тому найбільш правильно на вібростолах установлювати вібратори парами, розміщуючи по обертанню в різні сторони. Принципову схему розміщення вібраторів наведено на рис. 2.

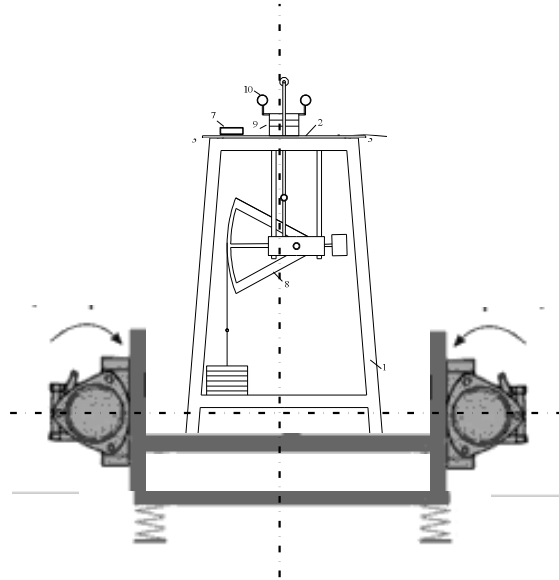


Рис. 2. Принципова схема розміщення вібраторів на вібростенді

При такому розміщенні вібраторів параметри направлених коливань визначаються таким чином:

1) вимушуюча сила $Q = 2Q_1$, де Q_1 – вимушуюча сила вібратора, кг;

2) амплітуда коливань $A = \frac{2Mct_1}{2m_1 + m}$,

де Mct_1 – статичний момент вібратора, кг·см;

m_1 – маса вібратора, кг;

m – маса вібростенда та випробувального приладу, кг.

Основним критерієм при виборі вібратора є його виштовхуючі зусилля. Визначення вимог до цього параметра виконується за формулою

$$Q > A \cdot M,$$

де A – максимальна величина віброприскорення при випробуваннях, m/c^2 ; M – повна маса установки, кг.

Відношення між вібраційним зміщенням, прискоренням та швидкістю визначаються відомими фізичними законами

$$a = v \times w, v = x \times w, a = x \times w^2, w = 2 \times \pi \times f,$$

де x – зміщення, м; v – швидкість, м/с; a – прискорення, m/c^2 ; f – частота, Гц; w – кругова частота, рад/с.

Амплітуду коливань і вимушуючу силу можна регулювати за рахунок зміни розташування дебалансів. Чим ближче ми зводимо дебаланси, тим більшу отримуємо силу. Якщо ж потрібна менша сила, а вібратор

змінювати немає можливості, то можна або полегшити дебаланси, або встановити вібропоглинаючу прокладку під вібратор.

Система контролю та управління вібраційними випробуваннями складається з набору контролюючих вібродатчиків і технічних засобів управління параметрами роботи вібраторів. Сучасні автоматичні системи управління вібраційними випробуваннями оснащено спеціальним програмним забезпеченням і включають у себе також систему збору та обробки результатів. Вони дозволяють керувати системою й отримувати результати експерименту за допомогою персонального комп'ютера. Частота коливань вібростенда регулюється за допомогою перетворювача частоти, який, крім того, забезпечує синхронну роботу електродвигунів. Система вібродатчиків, яка влаштовується на вібростенді, дозволяє контролювати параметри коливань на всіх етапах випробувань.

Для визначення закономірностей поведінки основ з водонасичених пісків при різних параметрах динамічних впливів передбачається варіювати досліджувані зразки піску за такими критеріями:

- за щільністю – пухкі та середньої щільності;
- за складом – пилюваті, дрібні, середньої крупності;
- за ступенем водонасичення;
- за величиною статичного стиску.

Динамічне ущільнення пісків кількісно характеризується зміною коефіцієнта пористості при заданих параметрах зовнішнього навантаження, що дозволяє перейти до розрахунку додаткових осідань ґрунту і зіставлення їх з допустимими. За результатами виконаних досліджень вплив наведених вище факторів буде виражений віброкомпресійними кривими зв'язку коефіцієнта пористості e з прискоренням коливань $a = A \cdot \omega$ (A – амплітуда і ω – частота коливань при різній величині статичних стискних навантажень).

Висновки. При проектуванні основ будівель та споруд, що працюють в умовах динамічних впливів, необхідно враховувати особливі властивості водонасичених пісків, у тому числі додаткові деформації за рахунок явищ віброкомпресії та віброповзучості. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, проблема адекватного моделювання поведінки ґрунтів при динамічних впливах не може вважатися повністю розв'язаною. Подальшу роботу має бути направлено на вдосконалення й деталізацію математичних та експериментальних моделей середовища, експериментальних методів дослідження й методів розв'язання задач з розрахунків основ, а також забезпечення їх відповідною нормативною базою.

Література

1. Vaid, Y.P. *Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands* / Y.P. Vaid, J.C. Chern // *ASCE National Convention, Session «Advances in the art of testing soils under cyclic loading»*. – Detroit, 1985. – P. 120 – 147.
2. Вознесенский, Е.А. *Поведение грунтов при динамических нагрузках* / Е.А. Вознесенский. – М.: Изд-во МГУ, 1997.

3. Casagrande, A. *Liquefaction and cyclic deformation of sands. A critical review / A. Casagrande // Lecture at 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. 1975. – P. 80 – 133.*

4. Кушнарева, Е.С. *Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: дис. / Е.С. Кушнарева. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 288 с.*

5. СП 11-105-97. *Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. V. Правила производства работ в районах с особыми природно-техногенными условиями. Прилож. Г. Лабораторные динамические испытания грунтов. – К., 1997.*

6. СП 11-114-2004. *Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. Прилож. Л. – М., 2004.*

7. ДСТУ EN 196-1:2007 (EN 196-1:2005, IDT). *Методи випробування цементу. Ч. 1. Визначення міцності. – К., 2007.*

Надійшла до редакції 15.10.2013

© А.М. Дворник