

**ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ
ДИСКРЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ПЛОСКОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**

Розглядається питання механічних випробувань макрозразків дискретного матеріалу в умовах плоско-деформативного напруженого стану. Описуються оригінальні прилади і методики, розроблені для реалізації цих специфічних лабораторних досліджень.

Ключові слова: дискретний матеріал, лабораторне обладнання, плоска деформація.

O.V. BAGRIY, V.V. KOVTUN
Khmelnitsky National University

**EQUIPMENT AND METHODS OF LABORATORY TEST
OF SAMPLES OF DISCRETE MATERIALS UNDER PLANE STRAIN CONDITIONS**

Abstract – For research of features of deformation of a discrete environment, and determining necessary for engineering calculations the mechanical properties need to create special equipment and to develop techniques for laboratory testing.

Considered the question of mechanical testing of macrosamples of a discrete material in the plane-strain stress state. Describes the original equipment and techniques developed for the implementation of these specific laboratory researches.

Described the equipment and testing procedures allow experimental research of deformation regularities of discrete materials in the least studied conditions of plane strain, and identify needed for specific engineering calculations of deformation parameters of these materials in the prelimit and limit conditions.

Keywords: discrete material, laboratory equipment, plane strain.

Вступ

За останні роки з потужної наукової галузі механіки деформівного тіла виділився самостійний напрямок – механіка дискретного середовища. Вона розглядає напружено-деформований стан області, заповненої фізично дискретним матеріалом, від дії силового чи кінематичного збурення. На відміну від сипкого і зернистого, дискретне середовище розглядається як квазісуцільне, що деформується за особливими законами. Його розрахункова модель формується за принципом моделей механіки твердого деформівного тіла, в основу якого покладено феноменологічний підхід, коли теоретичні рівняння суцільності, рівноваги та ін. доповнюються фізичними співвідношеннями, що описують особливості деформування конкретного класу матеріалів. Фізичні співвідношення формують зв'язок між напруженнями та деформаціями або швидкостями деформацій. Характер цих співвідношень встановлюється шляхом узагальнення результатів часткових експериментів з макрозразками матеріалу [1]. Це вимагає створення спеціального лабораторного обладнання та розробки методик, орієнтованих на окремі класи матеріалів, в нашому випадку – на дискретні матеріали.

Стан проблеми

Найбільш відомими і добре технічно забезпеченими є випробування зразків „класичних” твердих матеріалів. На жаль, лабораторне обладнання та методики, що розроблені для їх випробування не можуть бути безпосередньо використані для досліджень дискретних матеріалів з таких причин:

1) особливість будови фізично дискретних матеріалів не дозволяє виготовити їх зразки правильної геометричної форми (циліндричні, призматичні та ін.) без попереднього всебічного обтиснення для надання зразку початкової форми;

2) зразки дискретного матеріалу принципово неможливо випробувати в умовах простого напруженого стану (осьові розтяг і стиск, кручення), які для твердих матеріалів вважаються еталонними.

В технічному плані лабораторні системи для випробування зразків дискретних матеріалів повинні давати можливість створювати характерні для них траєкторії навантаження і на кожному етапі випробування фіксувати величини усіх компонентів тензорів напружень і деформацій. При розробці лабораторного обладнання та методик необхідно враховувати, що величини напружень у зразках дискретних матеріалів на два – три порядки менші, а деформації, які виникають, більші, ніж при випробуваннях твердих матеріалів.

Крім того, закони деформування дискретних матеріалів в більшій мірі, ніж твердих тіл, залежать від виду напружено-деформативного стану [2]. Тому логічно, щоб види напружено-деформативних станів у зразках матеріалу при лабораторних випробуваннях і роботі матеріалу в реальних умовах співпадали.

Сформульованим вимогам найбільшою мірою відповідають лабораторні прилади, розроблені для випробування природних ґрунтів, в першу чергу – прилади тривісного стиску (стабілометри).

Найбільш відомими є стабілометри типу *A* (рис. 1, а), де моделюється частковий випадок осесиметричного стану: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Стабілометри цього типу не дозволяють незалежно змінювати співвідношення головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, оскільки при зміні тиску *P* в камері одночасно змінюються величини усіх головних напружень.

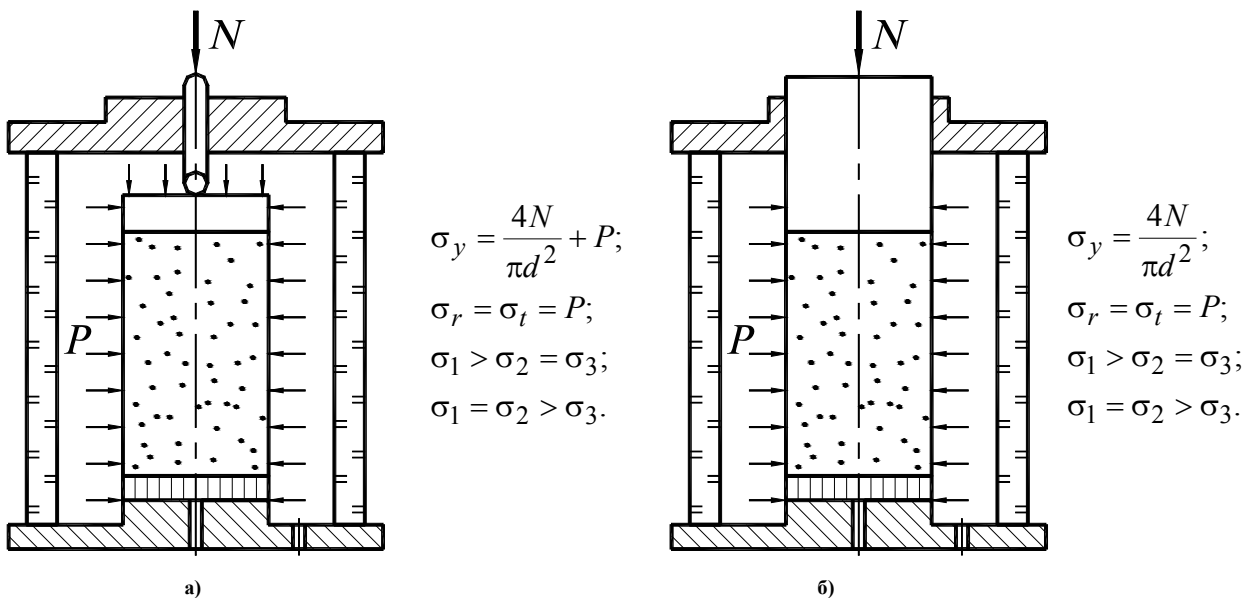


Рис. 1. Схеми випробувань на стабілометрах в умовах осесиметричного навантаження: а) типу А; б) типу В

Більш гнучкими в управлінні напруженим станом є стабілометри типу В (рис. 1, б). Завдяки тому, що тиск в камері цих приладів передається тільки на бокову поверхню циліндричного зразка, його осьові напруження σ_1 можна змінювати незалежно від тиску P в камері.

До недоліків стабілометричних досліджень можна віднести неможливість випробувань в інших напружено-деформативних станах окрім часткового осесиметричного стану. В більшості ж випадків інженерів цікавить плоско-деформативний напружений стан (плоска деформація), який не може бути створений в стабілометрах.

Другим принциповим недоліком стабілометричних випробувань є те, що на двох стадіях – попереднього обтиснення зразка дискретного матеріалу для надання йому початкової форми і, власне, його випробування за конкретною траєкторією навантаження, – створюються різні види напружено-деформативного стану. Враховуючи те, що принцип суперпозиції для нелінійно-деформівних тіл щодо визначення деформацій не може бути використаний, це призводить до неоднозначності результатів випробувань.

Завдання досліджень

Для вивчення особливостей деформування дискретного середовища і визначення необхідних для інженерних розрахунків механічних показників необхідно створити спеціальні прилади і розробити методики лабораторних випробувань.

В статті описані результати реалізації вказаного завдання.

Вибір схеми випробувань

Сформульовані вище вимоги найбільшою мірою виконуються в приладах тривісного стиску, у яких випробовують зразки ґрунтів кубічної форми. По гранях зразка через еластичні мембрани передається тиск рідини, величина якого змінюється в досліді за прийнятою програмою. Змінюючи тиски по різних гранях, можна створювати будь-який напружено-деформований стан у зразку.

Перші прилади з кубічними зразками створені в Англії під керівництвом А. Бішопа [3, 4] та в СРСР під керівництвом Г.М. Ломізе [5]. До переваг досліджень з цими приладами слід віднести можливість фіксувати величини головних напружень і деформацій на усіх етапах випробування зразка, а також змінювати напруження за прийнятою програмою для реалізації необхідних траєкторій навантажень. Завдяки цьому принципово можливо розв'язати сформульоване вище завдання. Однак технічні труднощі, що виникають при випробуваннях зразків дискретного матеріалу кубічної форми, не дозволяють впровадити вказані прилади в практику лабораторних випробувань. Крім того, на існуючих приладах з кубічним зразком не вдалось створити найбільш важливий для дискретних матеріалів плоско-деформативний напружений стан.

Для випробувань зразків дискретного матеріалу в умовах плоскої деформації запропоновано декілька схем. На рис. 2, а показана схема приладу двовісного стиску, що розроблений у Кембриджському університеті під керівництвом К. Роско. Аналогічні прилади створені І.В. Васильєвим, А.Н. Синяковим, А.Л. Крижанівським [6], А.К. Бугровим [7]. Недоліками таких приладів є передача навантаження через жорсткі штампи, що не дозволяє виключити вплив сил контактної тертя та однозначно визначити розподіл напружень по контактній поверхні жорсткого штампа.

Вказані недоліки частково ліквідовані у приладі В.А. Алписової [8], схема якого показана на рис. 2, б. Вертикальне навантаження передається на зразок за допомогою жорсткого штампа, горизонтальне – через еластичні мембрани. Бокові стінки двох інших граней виконані прозорими, що дозволяє фіксувати

картину деформацій.

Цікавими приладами плоскої деформації є „перекісники”, в яких зразки дискретного матеріалу у формі паралелепіпеда перекошуються при неможливості деформацій в перпендикулярному напрямку (рис. 2, в). Технічні рішення для реалізації схеми простого зсуву пропонували Г.І. Покровський, К. Роско, М.В. Малишев, Г.М. Ломізе, В.А. Мікуліч. Найбільш вдалим вважається прилад, який розроблений В.В. Ковтуном і Ф.М. Шихієвим [9].

Описані прилади плоскої деформації відносяться до класу приладів з кінематичним навантаженням через жорсткі штампи. Вони мають такі принципові недоліки: невизначеність напружень по контактам зі штампами і неможливість руйнування матеріалу у формі локальних зон зсуву.

Найбільш перспективна схема випробування дискретного матеріалу в умовах плоскої деформації показана на рис. 2, г. Зразок у формі паралелепіпеда навантажується по бокових гранях через гнучкі мембрани тиском рідини. Деформування зразка відбувається при зміні співвідношення тисків (головних напружень) по заданій програмі. При цьому висота зразка залишається незмінною ($\epsilon_z = 0$), що забезпечує виконання умов плоскої деформації. Силова схема навантаження ліквідує відмічені недоліки попередніх приладів, дозволяє реалізовувати необхідні траєкторії навантаження і фіксувати величини напружень та деформацій на усіх етапах дослідження.

Ця схема прийнята для розробки лабораторних приладів та методик випробування зразків дискретних матеріалів в умовах плоскої деформації.

Описання лабораторної системи

Основою лабораторної системи, розробленої для випробування зразків дискретних матеріалів в умовах плоскої деформації, вибрано прилад для випробувань незв'язних ґрунтів [10, 11]. Схема системи показана на рис. 3, а її загальний вигляд – на рис. 4.

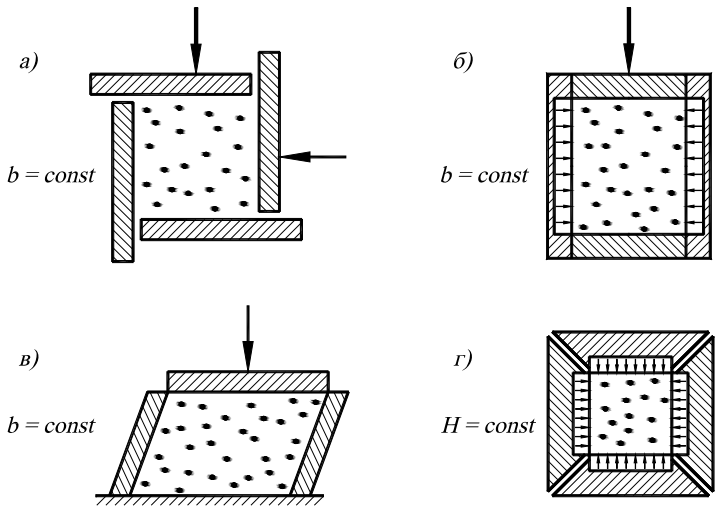


Рис. 2. Схеми випробувань в умовах плоскої деформації

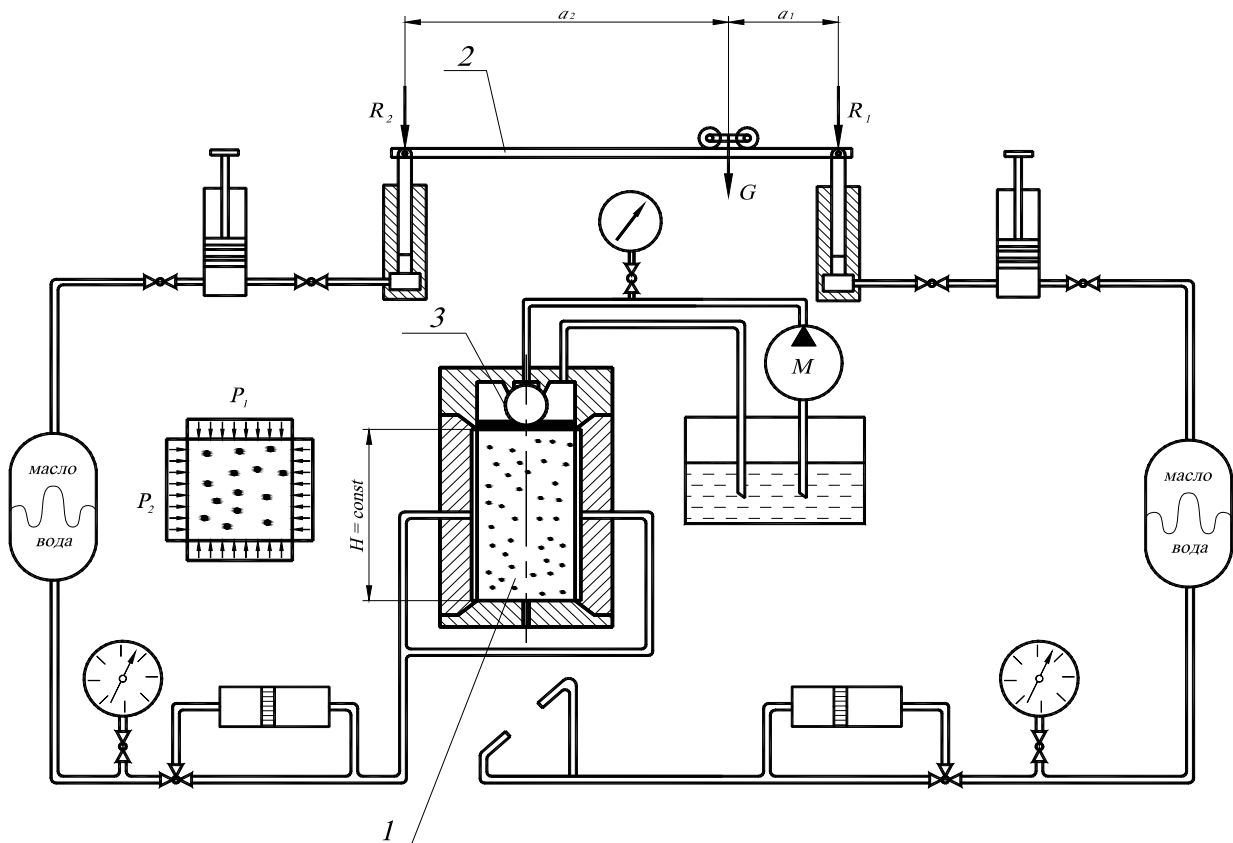


Рис. 3. Схема випробувальної системи

На схемі зображена випробувальна камера 1 зі зразком дискретного матеріалу призматичної форми. Гідравлічна навантажувальна система 2 розроблена для силового навантаження зразка за схемою двовісного стиску. Система дозволяє створювати необхідний рівень тиску на грані зразка, надійно фіксувати його величину, створювати практично будь-які траєкторії навантаження без складних регулювальних електронних систем. Основою системи є винахід [12].

Система 3 заміру осьових напружень створена на основі оригінального датчика контактних напружень, запропонованого В.Т. Бугасвим.

Основним елементом лабораторної системи є випробувальна камера. Вона призначена для створення зразків дискретного матеріалу правильної геометричної форми, збереження наданої форми до початку випробування, передачі на зразок двовісного навантаження в умовах плоскої деформації, фіксації величини усіх головних напружень і деформацій. Хоча принципова схема випробувань на двовісний тиск добре відома, для дискретного матеріалу вона практично не реалізована через досить суттєві технічні труднощі. Тому конструюванню камери приділялась особлива увага. За базову модель взято розроблений В.В. Ковтуном прилад [10].

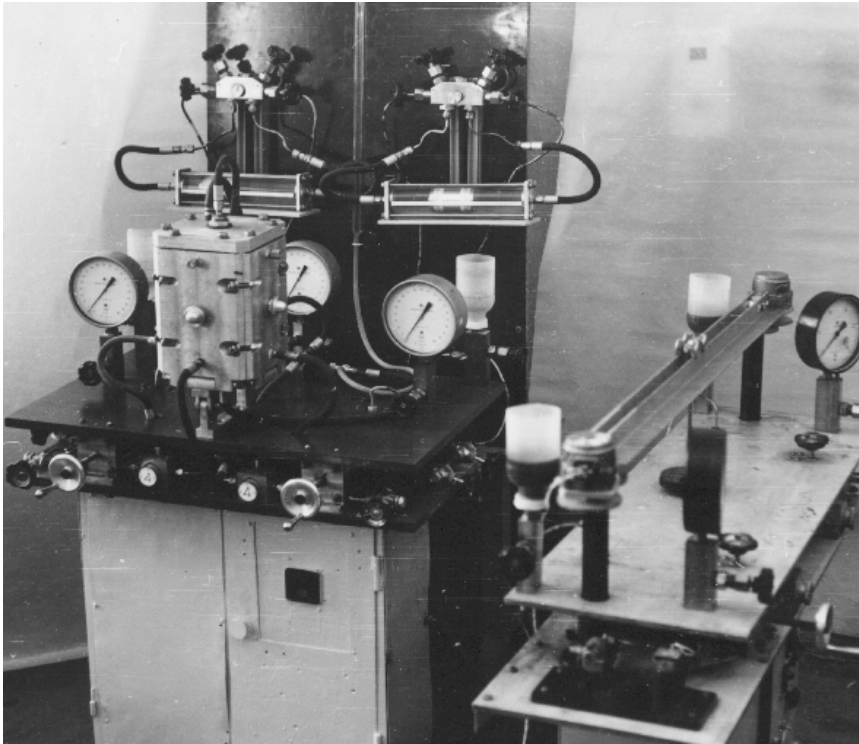


Рис. 4. Загальний вигляд випробувальної системи

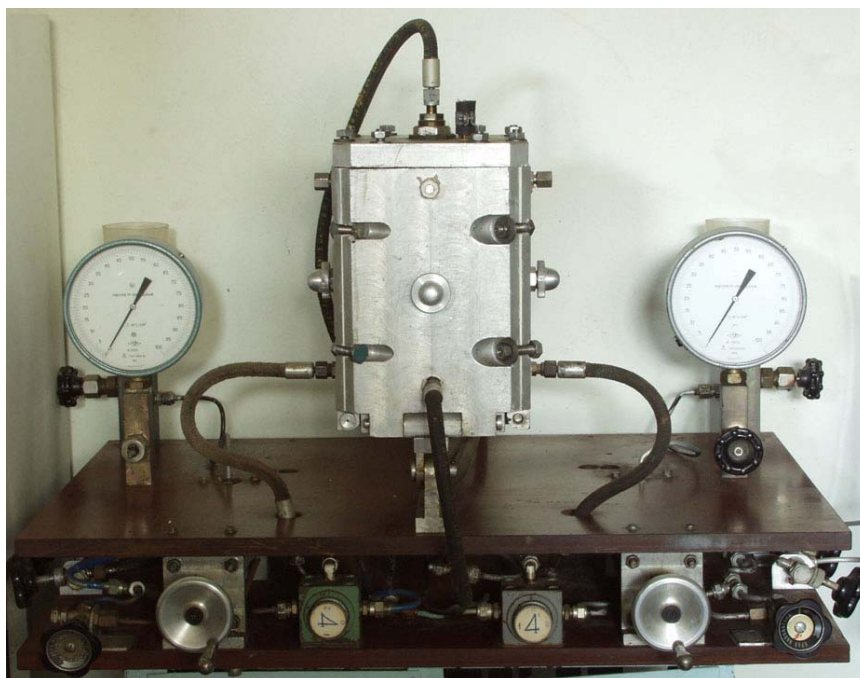


Рис. 5. Загальний вигляд випробувальної камери

Попередніми дослідженнями виявлено ряд недоліків і технічних труднощів, що пов'язані зі створенням зразка правильної форми, герметизацією камери, зі зменшенням впливу тертя по торцевих поверхнях і т.д. Ці недоліки і труднощі враховано в остаточній конструкції камери, загальний вигляд якої показаний на рис. 5, а конструктивна схема – на рис. 6.

Зразок 1 (рис. 6), обмежений по бокових гранях тонкими еластичними мембранами 5, формується прямо у випробувальній камері. Камеру утворюють: основа 2, до якої шарнірно прикріплені чотири відкидні бокові стінки 3; та кришка 8, в яку вмонтовано датчик осьових напружень.

Зразок 1 дискретного матеріалу має форму прямокутної призми з розмірами сторін $100 \times 100 \times 200$ мм, в деяких серіях – $50 \times 50 \times 100$ мм. Відношення висоти зразка до розмірів поперечного перерізу (2:1) вибрано для зменшення впливу тертя по його торцевих поверхнях. З цією ж метою за пропозицією О.В. Багрії на вказані контактні поверхні нанесено антифрикційне покриття на основі тефлону.

Для надання зразкам дискретного матеріалу правильної геометричної форми, а також для можливості проведення випробувань без попереднього етапу всебічного обтиснення, камера обладнана перфорованими пластинами 4, які можуть поступально переміщуватись в порожнинах 7 бокових стінок 3 за допомогою штоків 6. Крайне положення перфорованих пластин, коли вони торкаються еластичних мембран 5 по гранях зразка, дає змогу формувати зразок призматичної форми. Після передачі на мембрани через отвори пластин тиску робочої рідини пластини відводяться від граней, що дозволяє зразку вільно деформуватися. Бокові стінки мають отвори з штуцерами для приєднання до навантажувальної гідравлічної системи і отвори для виходу повітря при заповненні порожнин 7 рідиною.

Основа 2 камери має перфоровану пластину і отвір для виходу повітря або рідини з пор матеріалу зразка при його об'ємних деформаціях.

Важливим технічним питанням є герметизація багатьох стиків елементів камери. Для розв'язання цього питання крім стандартного рішення – обклеювання поверхонь стику гумою – запропоновано додатково обмазувати стик еластичним герметиком, який зберігає в'язкий стан протягом декількох місяців. Це просте рішення дозволило надійно герметизувати стики для робочих тисків до 1.5 МПа.

Знімна кришка камери крім прямого призначення служить датчиком у системі вимірювання осьових напружень σ_z (рис. 7).

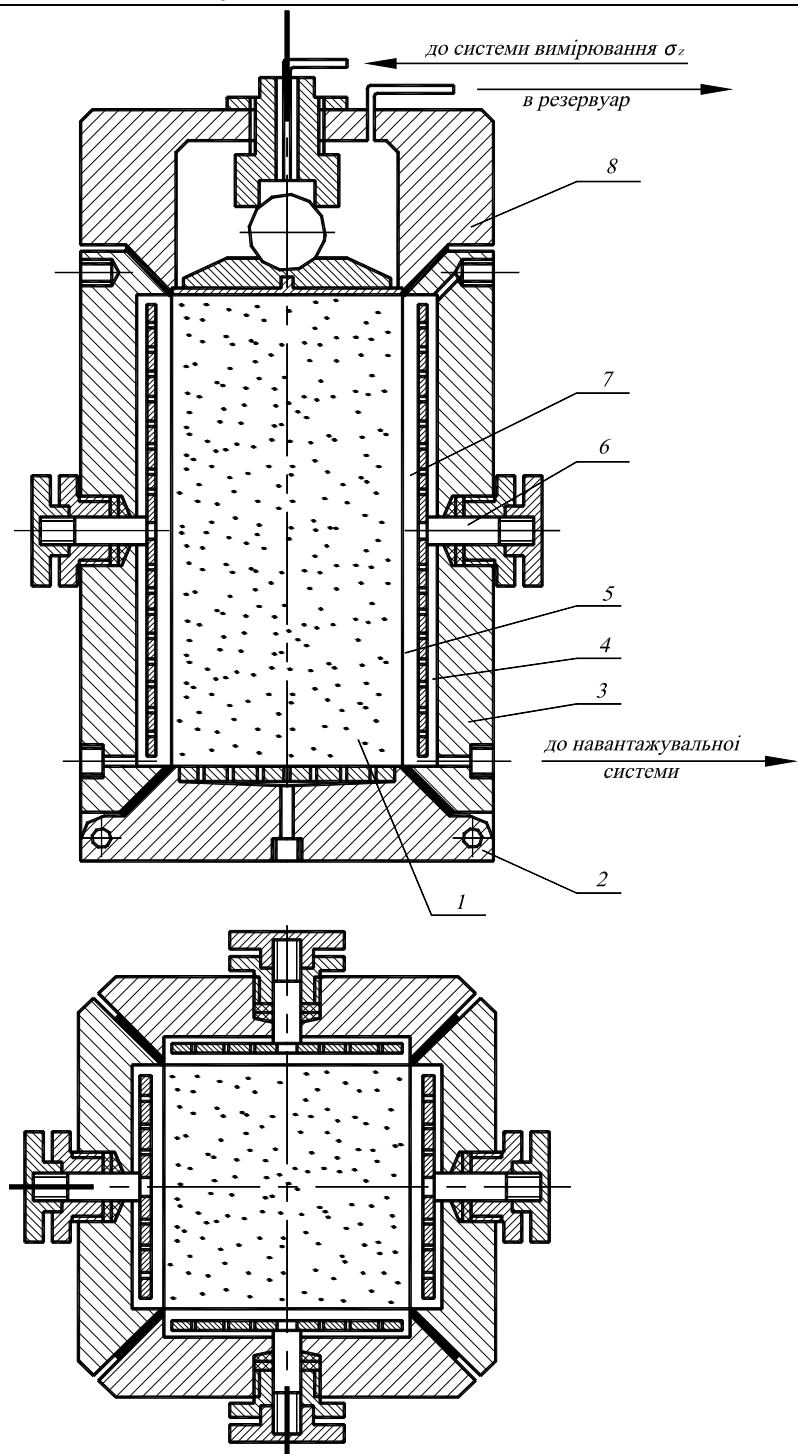
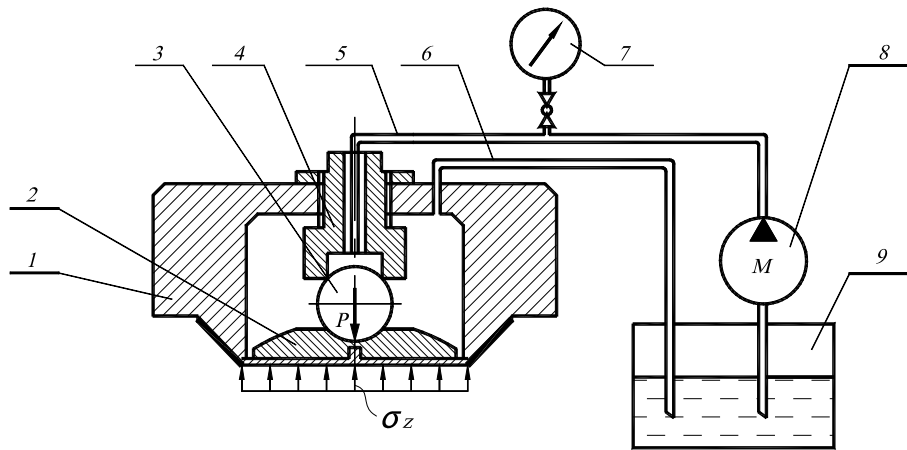


Рис. 6. Камера системи для випробування зразків дискретного матеріалу в умовах плоскої деформації

Рис. 7. Система вимірювання осьових напружень σ_z

До системи вимірювання напружень у напрямку нульових деформацій висуваються досить жорсткі вимоги щодо мінімального переміщення контактного елемента датчика. Показаний на рис. 7 датчик складається з корпуса 1, жорсткого штампа 2, кульового клапана 3, опорної втулки 4. Канал втулки з'єднаний з напірним трубопроводом 5, а порожнина в корпусі – з безнапірним трубопроводом 6 для зливу масла в резервуар 9. Тиск в напірному трубопроводі утворюється безперервно працюючим насосом 8 і фіксується манометром 7.

Система працює таким чином. Спочатку кульовий клапан 3 під тиском σ_z дискретного матеріалу закриває отвір втулки 4. Внаслідок роботи насоса 8 тиск масла в напірному трубопроводі 5 зростає до тих пір, поки сила контактної тиску зі сторони зразка і сила P тиску масла не зрівноважаться. Далі клапан відкривається і незначна кількість масла потрапляє у порожнину корпусу і трубопроводом 6 стікає в резервуар. Величина врівноважуючого тиску масла фіксується манометром 7.

Спеціальними перевірками встановлено, що переміщення мембрани в момент відкриття клапана не перевищує одного мікрметра, що дозволяє замірювати осьові напруження з високою точністю і забезпечує виконання умови плоскої деформації ($\varepsilon_z = 0$).

Під час випробувань зразка необхідно створювати та змінювати за відповідною програмою його навантаження, фіксувати на кожному етапі випробувань величини усіх компонентів тензорів напружень і деформацій. В більшості відомих приладів ця технічна задача розв'язується шляхом створення складних напівавтоматичних систем з використанням мікропроцесорів.

За результатами проведеного аналізу багатьох навантажувально-вимірювальних систем зроблено висновок, що для випробувань зразків дискретного матеріалу на двовісний стиск в умовах плоскої деформації найбільш ефективною є гідравлічна система [12]. Після її всебічного дослідження і ліквідації встановлених недоліків: зменшення сил тертя в плунжерних парах, вдосконалення пристроїв для заміру деформацій, надання можливості безступеневого навантаження з постійною швидкістю та інше, розроблено остаточний модифікований варіант гідравлічної системи. Її загальний вигляд показано на рис. 8, конструктивну схему – на рис. 9.

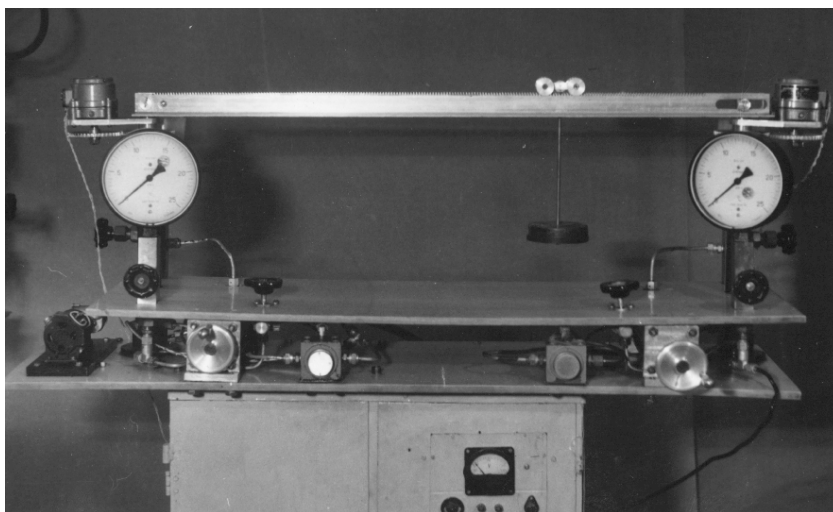


Рис. 8. Загальний вигляд гідравлічної навантажувальної системи

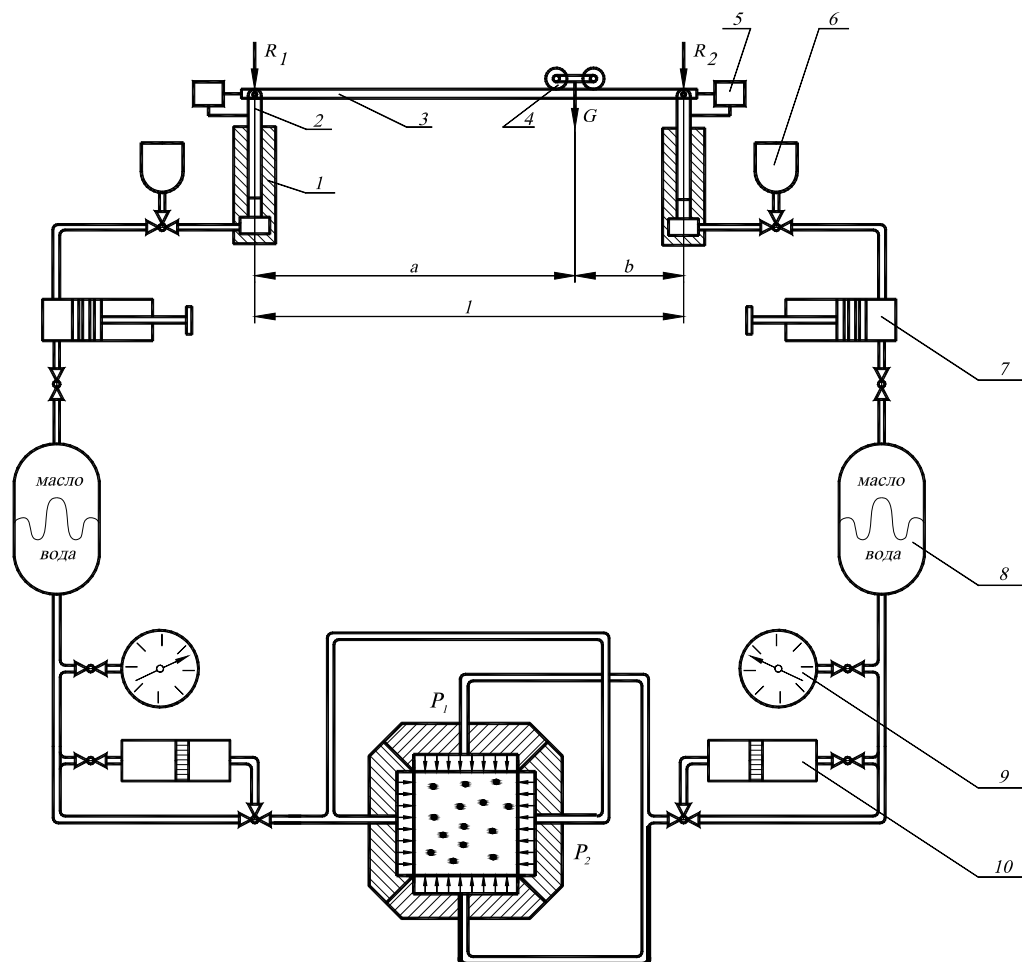


Рис. 9. Конструктивна схема навантажувально-вимірювальної системи

Основним елементом системи (рис. 9) є навантажувальний гідравлічний пристрій, що складається з двох гідравлічних циліндрів 1 з плаваючими поршнями-плунжерами 2, на які шарнірно опирається зубчаста рейка 3. По рейці з постійною швидкістю або з зупинками (при ступеневому навантаженні) переміщується візок 4 зі змінним вантажем. Спеціально розроблені пристрої 5 призначені для плавного переміщення візка 4, а також для зменшення сил тертя пари „циліндр – плунжер” за рахунок обертання останнього. Місткості 6 і маслоциліндри 7 використовуються для заправки системи маслом, а гідроаккумулятори 8 – для розмежування масла і води, тиском якої навантажується зразок при випробуванні.



Рис. 10. Загальний вигляд системи вимірювання бокових деформацій

Бокові деформації зразка визначаються за зміною об'єму води в порожнинах стінок камери. Зміна об'єму фіксується за допомогою волюметрів 10 (див. рис. 10), що складаються з градуйованих прозорих

циліндрів і поршнів, які можуть переміщуватися у внутрішніх порожнинах циліндрів. Тиск води, що передається на бокові грані зразка, фіксується манометрами 9.

Навантажувальний пристрій крім прямого призначення дозволяє створювати яку завгодно траєкторію навантаження без складних керуючих електронних систем.

Для випробувань дискретних матеріалів в умовах плоскої деформації найбільш інформативними є дві траєкторії навантаження:

- при сталій сумі головних напружень $\sigma_1 + \sigma_2 = const$ і зростанні їх відношення σ_1/σ_2 до моменту переходу в граничний стан;
- при зростанні суми головних напружень $\sigma_1 + \sigma_2$ в умовах незмінності їх відношення $\sigma_1/\sigma_2 = const$.

Перша траєкторія дозволяє плавно деформувати зразок матеріалу від початку навантаження до руйнування при сталій сумі головних напружень в процесі одного досліду і реалізується таким чином. На підвіску візка (рис. 9) укладається необхідний вантаж G , величина якого, а, значить, і суми сил, що передаються на плунжери, не змінюється в процесі одного досліду $G = R_1 + R_2 = const$. Напруження σ_1 і σ_2 , що дорівнюють тиску рідини у системі, пропорційні силам R_1 і R_2 . Сума цих сил, як сума реакцій балки, залишається незмінною для будь-якого положення візка. Тому незмінною буде і сума напружень. В процесі досліду візок переміщується від середини балки до однієї з опор. При цьому змінюються відстані a і b до опор і як наслідок – відношення напружень $R_1/R_2 = \sigma_1/\sigma_2 = b/a$.

Для реалізації другої траєкторії ($\sigma_1/\sigma_2 = const$) візок не переміщується вздовж балки, а залишається в заданому положенні, що забезпечує виконання умови $b/a = \sigma_1/\sigma_2 = const$. Зростання суми напружень досягається ступеневим або плавним навантаженням візка. Ця траєкторія навантаження використовується для вивчення закономірності зміни об'єму.

Інші, більш складні схеми навантаження реалізують одночасним переміщенням і навантаженням візка.

Циклічно змінні у часі навантаження створюються зворотно-поступальним рухом візка. Цей вид навантаження дозволяє розділити повні деформації на пружні та залишкові (пластичні) складові.

Таким чином, розроблена випробувальна система створює умови плоскої деформації, дозволяє: формувати призматичні зразки дискретних матеріалів правильної геометричної форми; навантажувати їх по бокових гранях тисками рідини за заданою програмою; фіксувати величини усіх головних напружень і деформацій.

Методика випробувань

Труднощі створення і випробування зразка дискретного матеріалу викликані особливостями його фізичної будови. Дискретний матеріал складається з окремих не зв'язаних або слабо зв'язаних між собою частинок. Він, практично, не сприймає розтягуючих напружень, тому зразок не зберігає надану йому форму без попереднього всебічного обтискування.

Призматичний зразок дискретного матеріалу формується безпосередньо у камері. Для цього знімають кришку камери і відкидають бокові стінки. Перфоровані пластинки, що знаходяться в порожнинах бокових стінок, обертанням штоків переміщують в крайнє положення, в якому вони будуть співпадати з гранями зразка. На бокові стінки за допомогою гвинтів прикріплюють металеві рамки з наклеєними на них еластичними мембранами. На поверхні стиків бокових стінок наносять шар герметика, повертають стінки у вертикальне положення і стягують їх болтами. Внаслідок цього основа камери та бокові стінки утворюють призматичну порожнину, обмежену по бокових гранях еластичними мембранами, підпертими перфорованими пластинами.

Порожнину камери заповнюють підготовленим до випробування дискретним матеріалом з попередньо визначеними його фізичними характеристиками (маса, щільність, за необхідністю – вологість та ін.). Поверхню створеного зразка ретельно вирівнюють. Після цього на неї встановлюють жорсткий штамп датчика осьових напружень, монтуєть і закріплюють за допомогою шпильок з гайками кришку камери.

Після створення зразка починають його випробування за прийнятою програмою без попереднього обтискування.

Тиск робочої рідини завдяки отворах в перфорованих пластинах передається через еластичні мембрани на бокові грані зразка. Перфоровані пластини при цьому не заважають деформаціям зразка. Після першого етапу навантаження пластини відводять від граней зразка, щоб вони не заважали його деформаціям на наступних етапах.

На кожному етапі навантаження за показниками манометрів визначають осьові напруження $\sigma_z = P_k = kP_c$, а також напруження σ_1, σ_2 в площині деформування, значення яких дорівнюють величинам гідравлічних тисків, що передаються на грані зразка $\sigma_1 = P_1; \sigma_2 = P_2$, а за показниками волюметрів – зміни об'ємів води $\Delta V_1, \Delta V_2$ в порожнинах бокових стінок, що необхідно для визначення деформацій зразка $\varepsilon = \Delta a/a_0$.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta V_1}{a_0 A_{zp}}; \varepsilon_2 = \frac{\Delta V_2}{a_0 A_{zp}},$$

де a_0 – початковий розмір сторони зразка,

A_{zp} – площа бокової грані зразка.

Функціонування гідравлічної навантажувально-вимірювальної системи забезпечується показаними на її схемі кранами, гідравлічними циліндрами, гідроаккумуляторами та ін.

Таким чином, описані випробувальна система і методики дозволяють: створювати зразок дискретного матеріалу призматичної форми, випробовувати його на двовісний стиск в умовах плоскої деформації, реалізовувати будь-яку траєкторію навантаження, визначати на кожному етапі випробування величини усіх компонентів тензорів напружень і деформацій.

Висновки

Описані в статті прилади і методика випробувань дозволяють експериментально досліджувати закономірності деформування дискретних матеріалів у найменш вивчених умовах плоскої деформації, а також визначати необхідні для конкретних інженерних розрахунків параметри деформування цих матеріалів як у дограничному, так і в граничному станах.

Література

1. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых тел. Часть I. Малые деформации / Белл Дж. Ф. – М. : Наука, 1984. – 597 с. Часть II. Конечные деформации / Белл Дж. Ф. – М. : Наука, 1984. – 432 с.
2. Гришин В. А. Нелинейные модели конструкций, взаимодействующих с грунтовой средой / В. А. Гришин, В. С. Дорофеев – Одесса : Внешрекламсервис, 2006. – 242 с.
3. Бишоп А. У. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях / А. У. Бишоп, Д. Д. Хенкель – М. : Госстройиздат, 1961. – 231 с.
4. Bishop A. W. Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens / A. W. Bishop // Proc. Roscoe Memorial Symp. on stress-strain Behavior of soils. – Cambridge, 1972. – P. 3–58.
5. Ломизе Г. М. Основные зависимости напряженно-деформативного состояния и прочности песчаных грунтов / Г. М. Ломизе, А. Л. Крыжановский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – № 3. – С. 8–11.
6. А. с. 302665 СССР. Прибор для исследований свойств грунта / А. Л. Крыжановский, Э. И. Воронцов, А. А. Музафаров, В. Г. Морозов (СССР).
7. Бугров А. К. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия / Бугров А. К., Нарбут Р. М., Сипидин В. П. – Л. : Стройиздат, 1987. – 184 с.
8. А. с. 1239591 СССР. Способ испытания грунтов и устройство для его осуществления / В. А. Алпысова, Э. Д. Трощенко (СССР). – Опубл. в Б.И. 1986, № 23.
9. А. с. 203997 СССР. Прибор для исследования грунта на сдвиг в условиях плоской деформации / В. В. Ковтун, Ф. М. Шихиев (СССР). – Опубл. в Б.И. 1967, № 21. – С. 108.
10. А. с. 1158925 СССР. Прибор для исследования свойств грунта в условиях плоской деформации / В. В. Ковтун, В. Г. Безносюк, Н. А. Мазур (СССР). – Опубл. в Б.И. 1985, № 20. – С. 175.
11. Ковтун В. В. Прибор для механических испытаний грунтов в условиях плоской деформации / В. В. Ковтун. – М. : ВНИИИЭСМ, 1987. – Вып. 6. – С. 21–25.
12. А. с. 1141158 СССР. Нагрузочное устройство для испытания грунтов в приборах трехосного сжатия / В. В. Ковтун, В. Г. Безносюк, Н. А. Мазур (СССР). – Опубл. в Б.И. 1985, № 7. – С. 97.

References

1. Bell J. F. Eksperimental'nye osnovy mehaniki deformiruemym tel. Chast' I. Malye deformacii. Moscow. Nauka. 1984. 597 p. Chast' II. Konechnye deformacii / Bell J. F. – М. : Nauka, 1984. – 432 s.
2. Grishin V. A., Dorofeev V. S. Nelineynye modeli konstrukciy, vzaimodeystvuyuschih s gruntovoy sredoy. Odessa. Vneshreklamservis. 2006. 242 p.
3. Bishop A. W., Henkel D. D. Opredelenie svoystv gruntov v trehosnykh ispytaniyah. Moscow. Gosstroyizdat. 1961. 231 p.
4. Bishop A. W. Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens. Proc. Roscoe Memorial Symp. on stress-strain Behavior of soils. Cambridge. 1972. P. 3–58.
5. Lomize G. M., Kryzhanovskiy L. Osnovnyye zavisimosti napryajenno-deformativnogo sostoyaniya i prochnosti peschanykh gruntov. Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov. 1966. № 3. P. 8–11.
6. Kryzhanovskiy A. L., Voroncov E. I., Muzafarov A. A., Morozov V. G. Patent. S. 302665 SSSR. Pribor dlya issledovaniy svoystv grunta.
7. Bugrov A. K., Narbut R. M., Sipidin V. P. Issledovanie gruntov v usloviyah trehosnogo sjiatiya. Leningrad. Stroyizdat. 1987. 184 p.
8. Alpysova V. A., Troschenkov E. D. Patent 1239591 SSSR. Sposob ispytaniya gruntov i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya. 1986. № 23.
9. Kovtun V. V., Shihiev F. M. Patent 203997 SSSR. Pribor dlya issledovaniya grunta na sdvig v usloviyah ploskoy deformacii. 1967. № 21. – P. 108.
10. Kovtun V. V., Beznosyuk V. G., Mazur N. Patent. 1158925 SSSR. Pribor dlya issledovaniya svoystv grunta v usloviyah ploskoy deformacii. 1985. № 20. P. 175.
11. Kovtun V. V. Pribor dlya mehanicheskikh ispytaniy gruntov v usloviyah ploskoy deformacii. Moscow. VNIIESM. 1987. Issue 6. P. 21–25.
12. Kovtun V. V., Beznosyuk V. G., Mazur N. A. Patent 1141158 SSSR. Nagruzochnoe ustroystvo dlya ispytaniya gruntov v priborah trehosnogo sjiatiya. 1985. № 7. P. 97.

Рецензія/Peer review : 15.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 6.4.2013 р.

Рецензент: д.т.н. Ковтун В.В.