

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИБУХОВОГО АРМУВАННЯ ПРОСАДНИХ ГРУНТОВИХ МАСИВІВ ЩЕБЕНЕМ

В статті запропоновано методику покращання геотехнічних характеристик просадних лесових масивів в основах фундаментів споруд через вибухове армування жорстким заповнювачем. Розроблено математичну модель проникнення щебеню в водонасичений ґрунтовий масив при динамічному впливі на нього вибуху циліндричного заряду ВР. Напружено-деформований стан армованого щебенем ґрунтового масиву оцінено з використанням програмного забезпечення PLAXIS.

Вступ. Армування ґрунтів є одним з перспективних напрямів посилення слабких, структурно-нестійких і просадних ґрунтів як основ споруд. Завдяки включенню в ґрунт армуючих елементів можна цілеспрямовано змінювати їх міцнісні і деформаційні параметри, підвищувати стійкість при статичних і динамічних навантаженнях, а також виключити нерівномірність осідань споруд, змінюючи жорсткість основи.

Сучасна ідея армованого ґрунту полягає в тому, що ґрунтове середовище при його армуванні спеціальними елементами через відповідні проміжки поводить як ґрунт з поліпшеними механічними властивостями. Завдяки армуючим елементам, розміщеним в ґрунті, відбувається перерозподіл навантажень з переобтяжених зон на сусідні, недовантажені.

Армування ґрунту жорстким природним заповнювачем (щебенем) за допомогою трамбівок застосовується досить давно і широко. Змінюється не тільки структура, але і мікроструктура просадного лесового ґрунту за рахунок зменшення товщини сольватних оболонок навколо глинистих часток лесового ґрунту під дією молекулярних сил притягання між частками. В результаті відбувається збільшення міцнісних і зниження деформаційних характеристик в основах. Але при цьому формування повністю нової структури не відбувається. За рахунок збереження цілісності сольватних оболонок ґрунт зберігає можливість при наступному зволоженні збільшувати товщину сольватних оболонок, тим самим знижуючи міцність структури.

Тільки динамічний метод ущільнення за допомогою енергії вибуху за рахунок стрибкоподібного підняття тиску здатний зруйнувати цілісність сольватних оболонок навколо часток ґрунту і перетворити його на повністю непродадний з формуванням його нової структури.

Метою роботи є поєднання розрахунків параметрів вибухового армування просадного лесового ґрунту щебеневою заповнювачем з використанням математичного апарата класичної теорії суцільного середовища та сучасного прикладного програмного забезпечення для аналізу зміни напружено-деформованого стану масиву до армування і після нього.

Викладення основного матеріалу. Виконано математичне моделювання проникнення щебеню в ґрунтовий масив при динамічному впливі на нього вибуху циліндричного заряду ВР, що дозволяє описати напружено-деформований стан ґрунту і частинок щебеню при різних фізико-механічних і геометричних параметрах вибуху.

При цьому процес розбивається на два етапи. На першому етапі розглядається рух частинок щебеню і продуктів вибуху при миттєвій детонації. На другому – досліджується процес руху щебеню та ґрунту.

Постановка задачі про метання щебеню в ґрунт за допомогою вибуху циліндричного заряду ВР здійснювалася таким чином. Щоб виключити вплив торців заряду і нерадіальність розльоту продуктів детонації, заряд вважався нескінченним, а детонація – миттєвою. Після вибуху заряду ВР продукти детонації (ПД) розширюються і захоплюють за собою частки щебеню, прискорюючи і прогріваючи їх до високої температури. Після того як продукти вибуху досягають межі з ґрунтом, виникає відбита ударна хвиля, яка призводить до гальмування частинок. Ступінь гальмування визначається параметрами відбитої хвилі і частинок щебеню. Очевидно, що більш дрібні частинки повинні відчувати більш сильне гальмування.

Розліт продуктів детонації повинен описуватися стандартними рівняннями динаміки суцільного стисливого середовища [1, 2]. Ці рівняння у формі законів збереження маси, імпульсу та енергії для випадку циліндричної симетрії мають вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho x + \frac{\partial}{\partial x} \rho u x = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u x + \frac{\partial}{\partial x} \rho u^2 x + p x = p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho x \left(E + \frac{u^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u x \left(E + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right) = 0, \quad (3)$$

де ρ , u , E , p – щільність, швидкість, внутрішня енергія і тиск газу; x – просторова координата; t – час.

Рівнянням стану ПД є рівнянням стану ідеального газу:

$$p = \rho R T, \quad (4)$$

де R – універсальна газова стала; T – температура газу.

Система рівнянь (1)–(4) є замкнутою для визначення термодинамічних величин ПД. Для чисельного розв'язання поставленої задачі використовувалася неявна різницева схема «предиктор–коректор», стійка при будь-якому відношенні $\Delta t / \Delta h$.

Використовувана різницева схема вимагає запису рівнянь руху суцільного середовища в характеристичній формі, яка для випадку циліндричної симетрії має вигляд:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + u + c \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -\frac{uc}{x}; \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + u - c \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{uc}{x}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

де c – швидкість звуку; S – ентропія.

Вважається, що всі частки щебеню під дією розширюваних продуктів вибуху рухаються компактною зоною, тобто параметри і координати всіх частинок близькі між собою, і їх можна описати параметрами однієї «міченої» частинки з даного шару.

Рівняння руху міченої частинки має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} \pi r^2 \rho_2 C_s |u - v| (u - v), \quad (8)$$

де m – маса частинки; x – її просторова координата; t – час; r – радіус; C_s – коефіцієнт опору; ρ_2 – щільність матеріалу; u – швидкість ПД; v – швидкість частинки щебеню.

Враховуючи, що для маси і швидкості частинки маємо вираз:

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2, \quad \frac{dx}{dt} = v, \quad (9)$$

отримаємо рівняння, що визначає швидкість частинки від часу:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3 \rho_2 C_s |u - v|}{8 r \rho_2}, \quad (10)$$

де C_s – коефіцієнт опору, що залежить від числа Рейнольдса частинки.

В розрахунках приймалося, що діаметр заряду ВР становив $d_0 = 0,04$ м, а свердловини – $d_{скв} = 0,250$ м. Як ВР прийнято амоніт № 6ЖВ детонаційними характеристиками: $P_n = 3,248 \cdot 10^9$ Па; $\rho_n = 1000$ кг/м³; $D_0 = 4340$ м/с; $Q = 1030$ ккал/кг; $\gamma = 1,25$.

Фізико-механічні характеристики щебеню: щільність при атмосферному тиску $\rho_0 = 1800$ кг/м³; щільність матеріалу частинок $\rho = 1900$ кг/м³. Діаметр частинок щебеню приймався рівним 20 і 40 мм. Зазначимо, що при діаметрі частинки щебеню рівному 20 мм, за радіусом порожнини міститься 5 частинок, а при діаметрі рівному 40 мм – 3 відповідно [3].

На рисунку 1 нанесено розташування 5-ти часток (точки 1...5), що послідовно і радіально заповнюють відстань між зарядом і стінкою свердловини. Залежності 1...5 демонструють закономірності наростання швидкості частинок щебеню в системі «ПД–щебінь» з часом після вибуху циліндричного заряду.

З рисунка 1 видно, що частки щебеню 1 і 2, які практично контактують або наближені до заряду, набувають максимальної швидкості понад 1000 м/с. На наступних частках ця швидкість також зростає в

часі менш інтенсивно, але починає перевищувати швидкість розширюваних ПД. З аналізу залежностей також випливає, що при досягненні хвилею межі зі щебенем відбувається стрибок швидкості, обумовлений виходом хвилі з менш щільного середовища в більш щільне (ефект відбиття від твердої стінки). При цьому виникає відбита ударна хвиля, яка гальмує потік газу, що набігає. Фронт відбитої ударної хвилі рухається від площини контактного розриву «ПД–щебінь» до осі заряду зі змінною швидкістю, що є наслідком зміни набігаючого потоку газу. Область відбитої ударної хвилі істотно впливає на швидкість частинок щебеню, призводячи до їх різкого гальмування. Після проходження часткою щебеню зони відбитої ударної хвилі її швидкість зменшується більш ніж на 250 м/с.

На рисунку 2 представлено зміну в часі тиску за фронтом розширюваних продуктів детонації для розглянутого вище випадку.

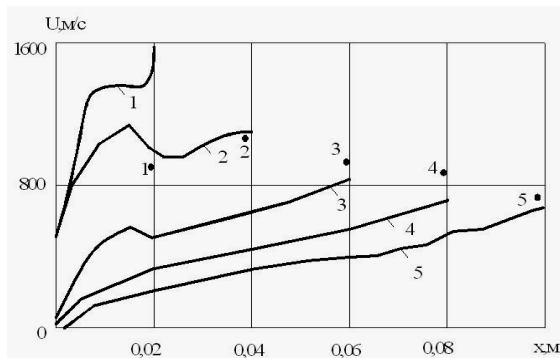


Рис. 1. Розвиток в часі швидкості часток 1...5 при вибуху циліндричного заряду амоніту № 6ЖВ. Криві 1 – до виходу ударної хвилі на першу частку, або на межу «продукти детонації–щебінь»; 2, 3, 4, 5 – до почергового приходу ударної хвилі на кожну наступну за відстанню

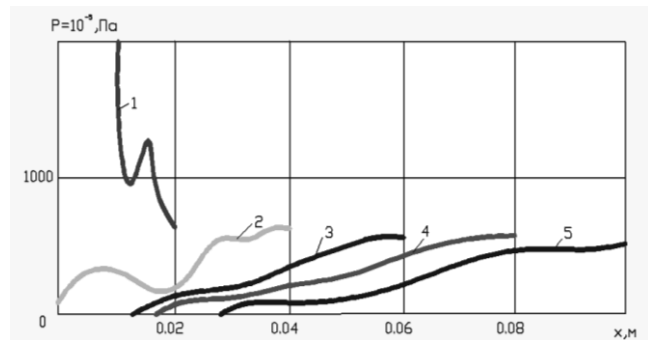


Рис. 2. Розподіл тиску при вибуху циліндричного заряду амоніту № 6ЖВ в різні моменти часу:

1 – до виходу ударної хвилі на межу «продукти детонації–щебінь» (на першу частку); 2, 3, 4, 5 – послідовний вихід хвилі на відповідну частку щебеню (діаметр частинки дорівнює 20 мм)

Характерному падінню тиску, згідно із залежністю 1, пояснення може полягати в практично стрибкоподібному його зростанні на контакті заряду з щебенем, яке передувало початкові процедури обрахунку за програмою. Залежності 2...5, що стосуються почергово віддалених від заряду частинок щебеню, відбивають характер наростання тиску ударної хвилі до зустрічі з відповідною (рис. 1) частинкою. Подальшому падінню тиску за кожною з цих залежностей не приділено уваги, оскільки вважається, що величина наступного впровадження часток в ґрунт визначається отриманим динамічним імпульсом, величина якого, в першу чергу, пов'язана зі зростаючою гілкою залежності $P(t)$.

При порівнянні результатів чисельного розрахунку для тих же параметрів заряду та типу ВР для часток щебеню вдвічі збільшеного радіуса встановлено, що хвильові процеси протікають за подібною ж схемою. Однак при збільшенні діаметра частинок щебеню відбувається генеральне зниження їх швидкості наближено на 400 м/с. Це пояснюється тим, що більші за розміром частки не встигають набрати достатньої швидкості в початковий момент руху, коли швидкість розльоту продуктів детонації найбільша. Очевидно, що зі збільшенням діаметра частинок щебеню буде відбуватися подальше зменшення визначальних параметрів руху.

В результаті математичного моделювання процесу проникнення щебеню в ґрунтовий масив при динамічному впливі на нього вибуху циліндричного заряду ВР встановлено, що частинки щебеню меншого діаметра при впливі на них продуктів детонації розлітаються з більшою швидкістю і при більшому тисковому порівняно з більшими за діаметром частками.

Розрахунки для різних типів ВР показують, що під час вибуху заряду амоніту № 6ЖВ, розглянуті параметри вищі, ніж при вибуху амоніту ПЖВ20 в зв'язку з нижчими детонаційними характеристиками.

Для одних і тих же діаметрів частинок щебеню більші значення радіальних напружень досягаються в ґрунті з меншим вмістом порового простору, тобто з більшою щільністю.

При збільшенні діаметра частинок відбувається падіння напружень як в ґрунті, так і на самих частках, але великі частки проникають у ґрунт на більші відстані. Глибина проникнення для розглянутих діаметрів часток складає від 3 до 7,5 діаметра зарядної свердловини.

При проникненні щебеню в ґрунт відбувається його ущільнення, причому на однакових відстанях більші значення об'ємної деформації досягаються в ґрунті з більш вільною пористістю.

Для аналізу зміни напружено-деформованого стану масиву просадного ґрунту після його динамічного армування щебенем застосовано програмне забезпечення PLAXIS, що стало свого роду сполучною ланкою між теоретичними дослідженнями і практичною роботою. PLAXIS може бути

застосований для вирішення більшості завдань у сфері традиційної механіки ґрунтів, а його програмні продукти призначені для моделювання динамічних процесів.

Моделювано утворення ущільненої армованої зони та виникнення камуфлетної порожнини після вибуху свердловинного заряду з тими ж характеристиками, що і при математичному моделюванні.

При моделюванні вважається, що навантаження по вертикалі рівномірно розподілене, прикладене по контуру свердловини і діє на глибину проектованої свердловини 10 м. До торцевої частини її навантаження не прикладається.

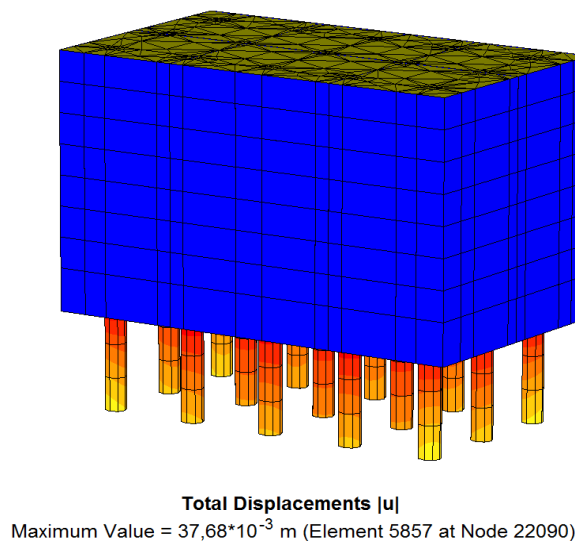
Розрахункова модель дозволяє визначити геометрію зон порушень, що утворились у результаті вибуху, та відстань, на яку щебінь проникне від проектного положення в навколишній лесовий ґрунт. Проектний діаметр порожнини, заповненої щебенем фракцією 20–40 мм при її глибині 10 м. Тиск, що діє на щебеневию заповнювач, моделюється як рівномірно розподілене навантаження, що складає 50 МПа. Береться до уваги, що щебінь, представлений в розрахунку суцільним ґрунтовим кластером, не надає можливості моделювання прикладання навантаження до кожної окремої частки щебеню залежно від її розміру і віддаленості від заряду. Програма Plaxis 3D дозволила розглядати процес попереднього замочування у моделі як штучний рівень води на верхній і нижній межах порожнини зі щебенем. Програма сприймає цей ґрунт як повністю водонасичений, а навколишній – як абсолютно сухий.

Для вивчення зміни несучої здатності ґрунтів за допомогою програми PLAXIS розглянуті дві розрахункові моделі ґрунтової основи.

В першій моделі основа під спорудою представлена ґрунтом зі зниженими характеристиками (табл. 1), відповідними замоченому лесові.

У другій моделі основа під тією ж спорудою представлена армованим ґрунтом із зонами, що утворилися після впровадження щебеню в ґрунт за допомогою вибуху.

Також враховано зони ущільненого ґрунту, що утворилися в результаті динамічного його ущільнення енергією вибуху. Таким чином, в основі будівлі розташовані з кроком 6×6 м ущільнені зони ґрунту радіусом 0,7 м з щебенем, що заповнив їх після вибуху (кластери в моделі задані сірим кольором), а також зони ґрунту з покращаними характеристиками після впливу на них вибухової хвилі, радіусом 3 м. Глибина заданих зон – 10 м. В результаті вибухового армування утворюється ущільнений масив із зонами ґрунтощебеню з підвищеними несучими характеристиками (рис. 3).



*Рис. 3. Армований масив
із зонами ґрунтощебеню*

Порівнюючи результати теоретичних досліджень на основі класичного математичного апарата теорії вибуху для визначення глибини впровадження щебеню в зволожений лесовий ґрунт, з результатами розрахунку зон деформацій масиву від проникнення щебеню в пакеті PLAXIS, ми бачимо відповідність отриманих значень.

Для оцінки зміни носійної здатності масиву була змодельована основа під спорудою армована щебенем за допомогою енергії вибуху.

В результаті вибухового армування утворюється ущільнений масив із зонами ґрунтощебеню [4] з підвищеними несучими характеристиками.

Розмір будинку – 17×29 м. Поверховість – 5 житлових і один підвальний поверхи. Фундаментна плита – завтовшки 0,75 м, позначка – 3 м від поверхні ґрунту. Зовнішні стіни мають товщину 0,5 м. Внутрішні стіни і міжповерхові перекриття завтовшки 0,25 м. Матеріал для всіх елементів – залізобетон.

Тимчасові і постійні навантаження на основу задані як рівномірно розподілене навантаження на рівні фундаментної плити, що за розрахунком становить $17,05 \text{ кН/м}^2$.

За рахунок нерівномірного розподілу тиску по підшві жорсткого фундаменту напруження на його краях будуть перевищувати структурну міцність ґрунту. Відповідно в цих зонах будуть розвиватися пластичні деформації з ущільненням. В основній частині будинку деформації розвиваються приблизно пропорційно у фазі пружних деформацій. Природно, чим більші зони, де напруги перевищують структурну міцність ґрунту, в них відбувається концентрація напружень та будуть виникати і розвиватися пластичні деформації (деформації зсуву).

Застосування щебеневого армування дозволяє заглибити напружену зону, а отже істотно зменшити просідання завдяки виключенню розущільнення ґрунтів основи. Армування ґрунту супроводжується зменшенням зон деформацій як під фундаментом, так і по боках від зон зрушень. Це призводить до зменшення інтенсивності осідання.

На рисунку 4 наведені закономірності розподілу переміщень ґрунтової основи для двох розрахункових моделей.

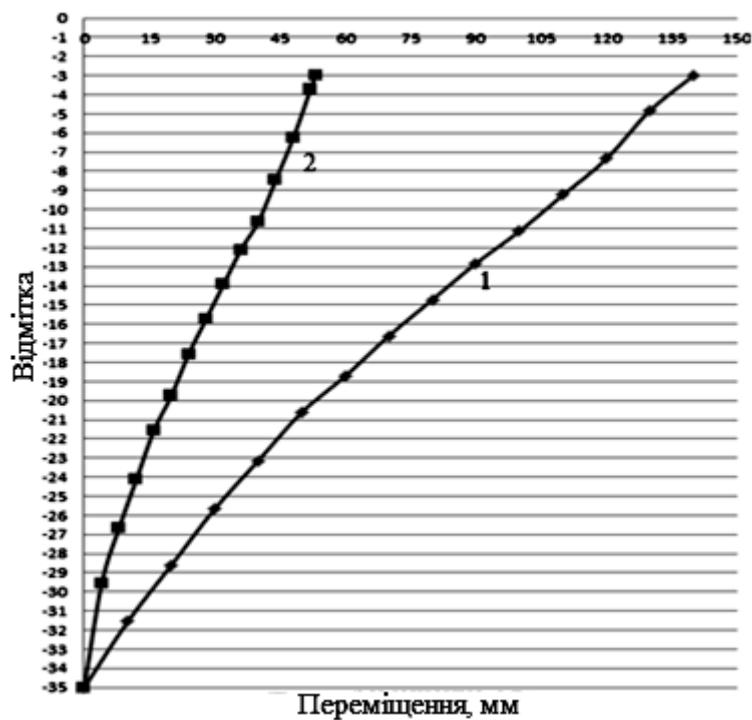


Рис. 4. Залежність переміщення ґрунту Δh від глибини:
1 – до армування ґрунтової основи; 2 – після армування ґрунтової основи

Як слідує з даних дослідження, деформація основи, яку отримано в результаті армування з урахуванням сумісної роботи ґрунту і будівлі, менша від граничного значення сумісної деформації основи і будівлі, розрахованого за нормативними документами.

Висновок. Дослідження, проведені в роботі, підтверджують ефективність армування структурно-нестійких ґрунтів на всю товщу просадного масиву, шляхом поєднання вибухового методу ущільнення з проникненням в нього жорсткого природного заповнювача за рахунок енергії вибуху. Як свідчать розрахунки, основи з армовано вибуховим способом ґрунту за участі щебеневого заповнювача мають значно поліпшені характеристики, підвищену несучу здатність і можуть бути рекомендовані в будівництві на просадних лесових ґрунтах.

Список використаної літератури:

1. *Лучко І.А.* Математичне моделювання дії вибуху в ґрунтах і гірських породах / *І.А. Лучко, Н.С. Ремез, А.І. Лучко*. – К. : НТУУ «КПІ», 2011.
2. *Кравець В.Г.* Математичне моделювання армування просадного ґрунту щебенем за допомогою вибуху циліндричного заряду / *В.Г. Кравець, Н.В. Зуєвська, Ю.В. Волик* // Вісник КТУ «Збірник наукових праць». – Кривий Ріг, 2011.
3. *Зуєвська Н.В.* Ліквідація просадних властивостей лесових ґрунтів шляхом впровадження в них твердого матеріалу за допомогою вибуху / *Н.В. Зуєвська* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2008. – № 2 (45). – С. 153–159.
4. *Кравець В.Г.* Процесс внедрения фракций жесткого материала в вязкоупругую среду под действием энергии взрыва / *В.Г. Кравец, Н.В. Зуевская* // «Форум гірників–2009». – 2009. – С. 79–84.
5. *Зуевская Н.В.* Влияние теплопроводности жесткого материала на эффективность армирования водонасыщенного грунта энергией взрыва / *Н.В. Зуевская* // Geotechnika-Geotechnics 2008 ; XIII Międzynarodowe Sympozjum Czesc II: zagraniczna : Materiały Naukowe. – Gliwice-Ustron, 2008. – С. 71–79.
6. *Зуєвська Н.В.* Несуча здатність лесових ґрунтів при утворенні зони ґрунтощебеню за допомогою енергії вибуху / *Н.В. Зуєвська, Л.В. Шайдецька, Ю.В. Волик* // зб. наук. пр. НГУ. – № 36. – Д., 2011.
7. *Зуєвська Н.В.* Formation of engineering properties of the unstable soils under impact or tamping or explosions / *N.V. Ivkina (Н.В. Зуєвська), W.G. Kravec, E.A. Varga* // Geotechnics-97, Slovak Republic, High Tatras. – 1997. – С. 22–28.

ЗУЄВСЬКА Наталя Валеріївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри геобудівництва та гірничих технологій, заступник директора Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- дослідження в галузі геобудівництва;
- вибухове армування.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2012