

Б.Б. Корчевський
І.Ю. Кириця
О.В. Петров
І.Віштак
С.І.Сухоруков

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ОСНОВ АРМОВАНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Руйнування армованої ґрунтової основи горизонтальними гнучкими елементами можна представити у вигляді трьох схем [1,2]: внаслідок зсуву ґрунту між подошвою фундаменту та першим шаром арматурного елемента, від проковзування арматурних елементів та від їх розриву. Перша схема руйнування не являє особливого інтересу, оскільки при вертикальному прикладанні навантаження її можна досить просто уникнути, використовуючи оптимальні параметри створення армованої основи. Що стосується двох інших схем, то поки пропозиції щодо методів їх розрахунків хоча і розроблені деякими дослідниками, але обґрунтовані недостатньо.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка методу розрахунку армованої основи при двох видах її руйнування – внаслідок розриву (арматурні елементи не проковзують у ґрунті подушки) та проковзування арматурних елементів та дослідження коефіцієнта тертя арматури у вигляді суцільного матеріалу та сітки по ґрунті в залежності від фізико-механічних характеристик ґрунту подушки та арматури.

Ключові слова: *арматурні елементи, армовані основи, методи розрахунку за другою групою граничних станів, фізико-механічні характеристики армованого ґрунту.*

Основна частина

Розглянемо розрахунок армованої основи на базі на статистичного методу. Статистичний метод для розрахунку не армованого ґрунту було використано автором [2]. Він підійшов до вирішення цієї проблеми найпростішим шляхом. Розглядаючи процес ущільнення не армованого ґрунту, можна помітити два явища, що мають протилежний вплив на опір ґрунту деформації. Перше представляє собою збільшення щільності і як наслідок збільшується опір ґрунту, тому можна прийняти, що приріст опору $\Delta_1 p$ пропорційний ущільнюючому тискові p та величині деформації $\Delta \varepsilon$:

$$\Delta_1 p = A_1 p \Delta \varepsilon \quad (1)$$

де A_1 – постійна.

З іншої сторони, в результаті відносного зсуву частинок, одночасно з ущільненням проходить руйнування первинних зв'язків між ними та послаблення ґрунту, таким чином, якщо міцність ґрунту на одновісне стиснення позначити через q , то падіння опору $\Delta_2 p$ необхідно прийняти пропорційним різниці між q та прикладеним тиском p , так і деформації (поперечне розширення) $\nu \Delta \varepsilon$ (ν - коефіцієнт Пуассона):

$$\Delta_2 p = A_2(q - p)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

де A_2 – постійна, що включає в себе ν , тобто $A_2 = A_1 \nu$.

Для розрахунку армованого ґрунту, авторами [2, 3, 4] було запропоновано, ввести третю подію, що враховує ефект армування. Вона представляє собою підвищення опору армованого ґрунту внаслідок включення в роботу горизонтальних арматурних елементів, що перерозподіляють прикладене навантаження на більшу площу ґрунту, при цьому розвантажуючи перевантажені зони і довантажуючи недовантажені. Цей приріст опору $\Delta_3 p$ прямо пропорційний прикладеному навантаженню p , коефіцієнту тертя арматурних елементів по ґрунту μ та величині зворотній поперечному розширенню $\nu\Delta\varepsilon$:

$$\Delta_3 p = A_1 \beta p \mu (1 - \nu) \Delta\varepsilon \quad (3)$$

де $\beta = \beta_1 \times \beta_2$, і β_1 – коефіцієнт, що залежить від μ ; β_2 – коефіцієнт, що залежить від кількості шарів армування та виду армованої основи.

Також, автором [2] введено четверту подію, що враховує зменшення опору армованого ґрунту внаслідок розриву арматурних елементів. Аналогічно до не армованого ґрунту позначимо опір арматури на розтяг через q_a , тоді падіння опору армованого ґрунту прямо пропорційно різниці q_a та p , так і поперечній деформації $\nu\Delta\varepsilon$:

$$\Delta_4 p = A_1 \beta (q_a - p) \mu \nu \Delta\varepsilon \quad (4)$$

Події 1÷4 йдуть одночасно або послідовно і незалежно одна від одної. Можливі комбінації рівно можливих подій:

1. зміцнення за рахунок ущільнення $\Delta_1 p$ та послаблення за рахунок поперечного розширення $\Delta_2 p$ (за Покровським Г.І.);
2. зміцнення за рахунок ущільнення $\Delta_1 p$ та за рахунок армування $\Delta_3 p$;
3. зміцнення за рахунок армування $\Delta_3 p$ та послаблення за рахунок поперечного розширення $\Delta_2 p$;
4. зміцнення за рахунок армування $\Delta_3 p$ та послаблення за рахунок розриву арматурних елементів $\Delta_4 p$;
5. послаблення за рахунок розриву арматурних елементів $\Delta_4 p$ та поперечного розширення $\Delta_2 p$.

Настання тої чи іншої події залежить від характеру руйнування армованого масиву:

- а) руйнування внаслідок розриву арматури;
- б) руйнування внаслідок втрати зчеплення між арматурою та ґрунтом (адгезійне руйнування).

При руйнуванні першого типу (а) можлива поява комбінацій подій 1, 2, 4 та 5, при другому типі (б) – можлива поява комбінацій подій 1,2,3.

Спочатку розглянемо руйнування типу (а):

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta_1 p \times \Delta_2 p + \Delta_1 p \times \Delta_3 p + \Delta_3 p \times \Delta_4 p + \Delta_2 p \times \Delta_4 p, \\ \Delta p &= A_1 A_2 (q - p) p \Delta\varepsilon + A_1^2 p^2 \beta \mu (1 - \nu) \Delta\varepsilon + A_1^2 \beta^2 (q_a - p) p \mu^2 (1 - \nu) \nu \Delta\varepsilon + \\ &\quad + A_1 A_2 \beta (q - p) (q_a - p) \mu \nu \Delta\varepsilon \\ \Delta p &= A_1 A_2 p \Delta\varepsilon [q - p + p \beta \mu (1 - \nu) A_1 / A_2 + (q_a - p) \beta^2 \mu^2 (1 - \nu) \nu A_1 / A_2 + \\ &\quad + (q - p) (q_a - p) \beta \mu \nu / p] \end{aligned}$$

нехай $A_1 A_2 = A$, а $A_1 / A_2 = 1/\nu$ згідно сказаного вище, тоді

$$\begin{aligned} \Delta p &= A p \Delta\varepsilon [q - p + p \beta \mu (1 - \nu) / \nu + (q_a - p) \beta^2 \mu^2 (1 - \nu) + (q q_a - p q_a - p q + p^2) \beta \mu \nu / p] \\ \Delta p &= A p \Delta\varepsilon [q(1 - \beta \mu \nu) + q_a \beta \mu \{ \beta \mu (1 - \nu) - \nu \} - \{ 1 - \beta \mu (1 - \nu - \beta \mu \nu + \beta \mu \nu^2 + \nu^2) \} / \nu] p + \\ &\quad + q q_a \beta \mu \nu / p], \end{aligned}$$

нехай

$q(1 - \beta\mu\nu) + q_a\beta\mu\{\beta\mu(1 - \nu) - \nu\} = Q,$
 $1 - \beta\mu(1 - \nu - \beta\mu\nu + \beta\mu\nu^2 + \nu^2)/\nu = 1 - \beta\mu(1 + (1 + \beta\mu)(\nu^2 - \nu))/\nu = c$
 та $q_a\beta\mu\nu = k$, то переходячи до диференціалів, отримаємо:

$$dp = Ap(Q - cp + k/p)d\varepsilon$$

$$dp = A(Qp - cp^2 + k)d\varepsilon \quad (5)$$

Інтегруємо вираз (5)

$$\int \frac{dp}{cp^2 - Qp - k} = -A \int d\varepsilon,$$

$$\int \frac{dp}{p^2 - \frac{Qp}{c} - \frac{k}{c}} = -Ac \int d\varepsilon, \quad (6)$$

знайдемо дискримінант квадратного рівняння, що знаходиться в знаменнику лівої частини рівняння (6)

$$D = Q^2/c^2 + 4k/c$$

тоді розв'язками даного рівняння буде $p_1 = (Q/c - \sqrt{D})/2$ та $p_2 = (Q/c + \sqrt{D})/2$, рівняння (6) набуде вигляду:

$$\int \left(\frac{1}{\sqrt{D} \left(p - \frac{Q + \sqrt{D}}{2} \right)} - \frac{1}{\sqrt{D} \left(p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2} \right)} \right) dp = -(Ac\varepsilon + Anc),$$

$$\int \frac{dp}{p - \frac{Q + \sqrt{D}}{2}} - \int \frac{dp}{p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2}} = -(A\sqrt{D}c\varepsilon + Anc\sqrt{D}),$$

$$\ln \left(p - \frac{Q + \sqrt{D}}{2} \right) - \ln \left(p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2} \right) = -[A\sqrt{D}c\varepsilon + Anc\sqrt{D}],$$

$$\ln \left(\frac{p - \frac{Q + \sqrt{D}}{2}}{p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2}} \right) = -[A\sqrt{D}c\varepsilon + Anc\sqrt{D}],$$

$$\frac{p - \frac{Q + \sqrt{D}}{2}}{p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2}} = e^{-A\sqrt{D}c\varepsilon} e^{-Anc\sqrt{D}},$$

$$1 - \frac{\sqrt{D}}{p - \frac{Q - \sqrt{D}}{2}} = e^{-A\sqrt{D}c_3\varepsilon} e^{-Anc\sqrt{D}},$$

де $e^{-Anc\sqrt{D}} = c_3$ постійна інтегрування та нехай $(Q/c - \sqrt{D})/2 = Q_1$,

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\sqrt{D}}{p - Q_1} &= c_3 e^{-Ac\sqrt{D}\varepsilon}, \\ 1 - c_3 e^{-Ac\sqrt{D}\varepsilon} &= \frac{\sqrt{D}}{p - Q_1}, \\ p &= \frac{\sqrt{D}}{1 - c_3 e^{-Ac\sqrt{D}\varepsilon}} + Q_1, \end{aligned} \quad (7)$$

при $\varepsilon=0$

$$p = \frac{\sqrt{D}}{1 - c_3} + Q_1, \quad (8)$$

так як при $\varepsilon=0$ зовнішні сили відсутні, то згідно з авторами [2, 4], значення p у виразі (8) варто віднести за рахунок внутрішніх сил взаємодії частин (під внутрішніми силами розуміється, як сили тяжіння так і сили зчеплення, що притискують частинки одну до одної), тобто нехай $p=q_0$, тоді знаходимо:

$$c_3 = 1 - \frac{\sqrt{D}}{q_0 - Q_1}, \quad (9)$$

підставляючи (9) в (7) та віднімаючи величину q_0 (для зручності розрізнення ділянок стиснення та розтягу) маємо

$$p = \frac{\sqrt{D}}{1 + \left(\frac{\sqrt{D}}{q_0 - Q_1} - 1 \right) e^{-Ac\varepsilon\sqrt{D}}} + Q_1 - q_0. \quad (10)$$

Вираз (10) дає можливість розрахунку армованого масиву у випадку розриву арматурних елементів.

В більшості випадків армований масив руйнується внаслідок втрати зчеплення арматурних елементів з ґрунтом, тому має сенс розглянути розрахунок армованого масиву при такому типі руйнуванні. Отже, як зазначалося вище, в даному випадку можливе настання трьох комбінацій подій 1, 2 і 3.

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta_1 p \times \Delta_2 p + \Delta_1 p \times \Delta_3 p + \Delta_2 p \times \Delta_3 p \\ \Delta p &= A_1 A_2 (q - p) p \Delta \varepsilon + A_1^2 p^2 \beta \mu (1 - \nu) \Delta \varepsilon + A_1 A_2 (q - p) p \beta \mu (1 - \nu) \Delta \varepsilon \\ \Delta p &= A_1 A_2 p \Delta \varepsilon [q - p + \beta \mu (1 - \nu) p A_1 / A_2 + (q - p) \beta \mu (1 - \nu)] \\ \Delta p &= A p \Delta \varepsilon [q(1 + \beta \mu (1 - \nu)) - p(1 - \beta \mu (1 - \nu^2) / \nu)] \end{aligned} \quad (11)$$

нехай у (11) $1 + \beta \mu (1 - \nu) = c_1$ та $1 - \beta \mu (1 - \nu^2) / \nu = c_2$, тоді (11) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta p &= A p \Delta \varepsilon (c_1 q - c_2 p), \\ \Delta p &= A c_1 \left(q - \frac{c_2}{c_1} p \right) p \Delta \varepsilon. \end{aligned} \quad (12)$$

Замінімо $A c_1 = B$, $c_2/c_1 = m$, тоді розв'язуючи рівність (12), при переході до диференціалів, використовуючи методику представлену вище, отримаємо рішення:

$$p = \frac{q}{m \left(1 + \left(\frac{q}{mq_0} - 1 \right) e^{-Bq\varepsilon} \right)} - q_0. \quad (13)$$

Формула, яку отримав Покровський Г.І. [2] має вигляд

$$p = \frac{q}{\left(1 + \left(\frac{q}{q_0} - 1 \right) e^{-Aq\varepsilon} \right)} - q_0. \quad (14)$$

Структура виразу (14) та отриманого виразу (13) майже однакова, різниця полягає лише в наявності коефіцієнта m , що враховує ефект армування в залежності від параметрів ν та μ при адгезійному руйнуванні армованого ґрунту. Що стосується руйнування внаслідок розриву арматурних елементів, то крім зазначених параметрів формула (10) включає міцність арматурних елементів на розрив q_a .

Крива залежності “навантаження – відносна деформація” при адгезійному руйнуванні, формула (13), має наступні характерні ділянки – опуклість вниз, лінійну зростаючу ділянку та опуклість вгору, така ж послідовність характерна для формули Покровського (рис. 1). При руйнуванні внаслідок розриву арматурних елементів крива має дві ділянки – лінійно зростаючу ділянку та опуклість вгору (рис. 1), що характерно для деформування при розтягуванні геотекстиля та при стискуванні ґрунту. Швидкість зростання цих функцій залежить від параметрів A_1 і q_a , а величина критичного навантаження від параметрів ν , μ , β_1 , β_2 , q .

Щодо коефіцієнта тертя арматурних елементів по ґрунту, то при його зростанні, значення коефіцієнта β_1 спадає. При збільшенні кількості шарів арматурних елементів коефіцієнт β_2 зростає, згідно числового моделювання, при чому, він змінюється в межах від 1 до 1,15.

Для ілюстрації можливості застосування розробленого методу для розрахунку армованого ґрунту, порівняємо результати отримані з використанням цього методу з експериментальними даними [5] (рис. 2) при руйнуванні армованого ґрунту внаслідок проковзування арматурних елементів у ґрунті.

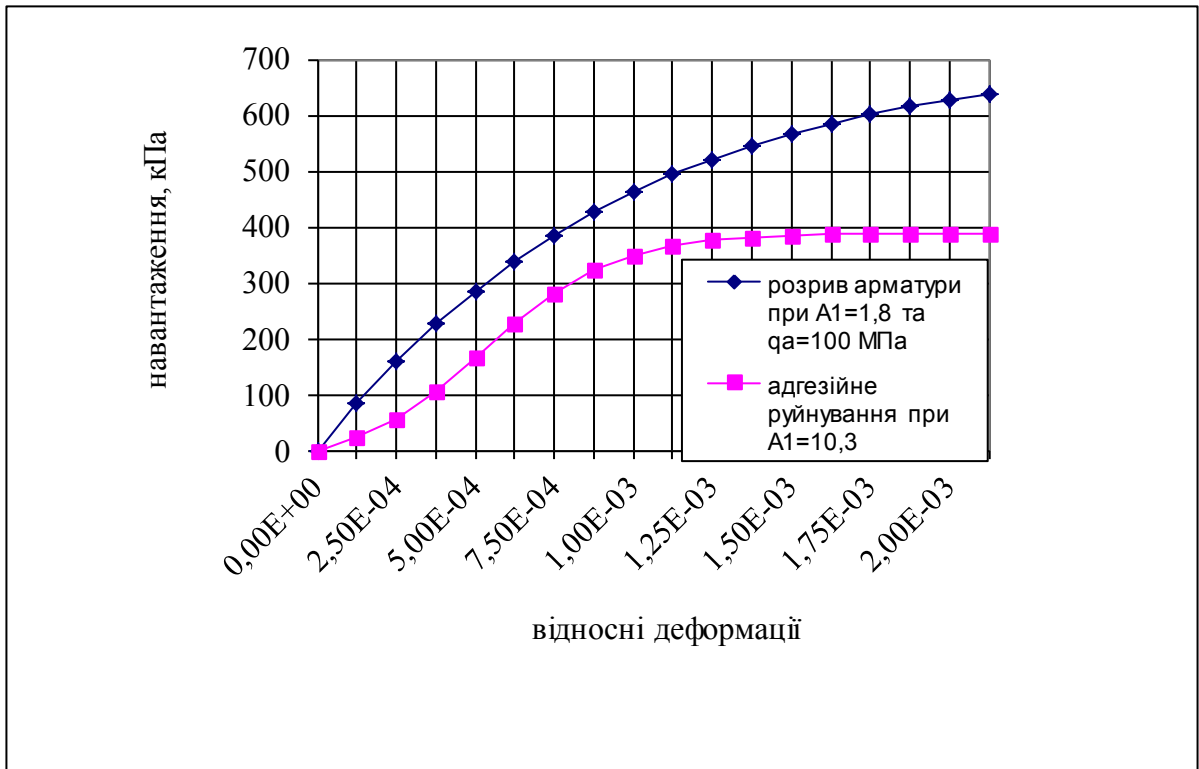


Рисунок 1. Характер зміни теоретичних кривих при $q=140$ кПа, $q_0=30$ кПа, $\nu=0,27$; $\mu=0,3$.

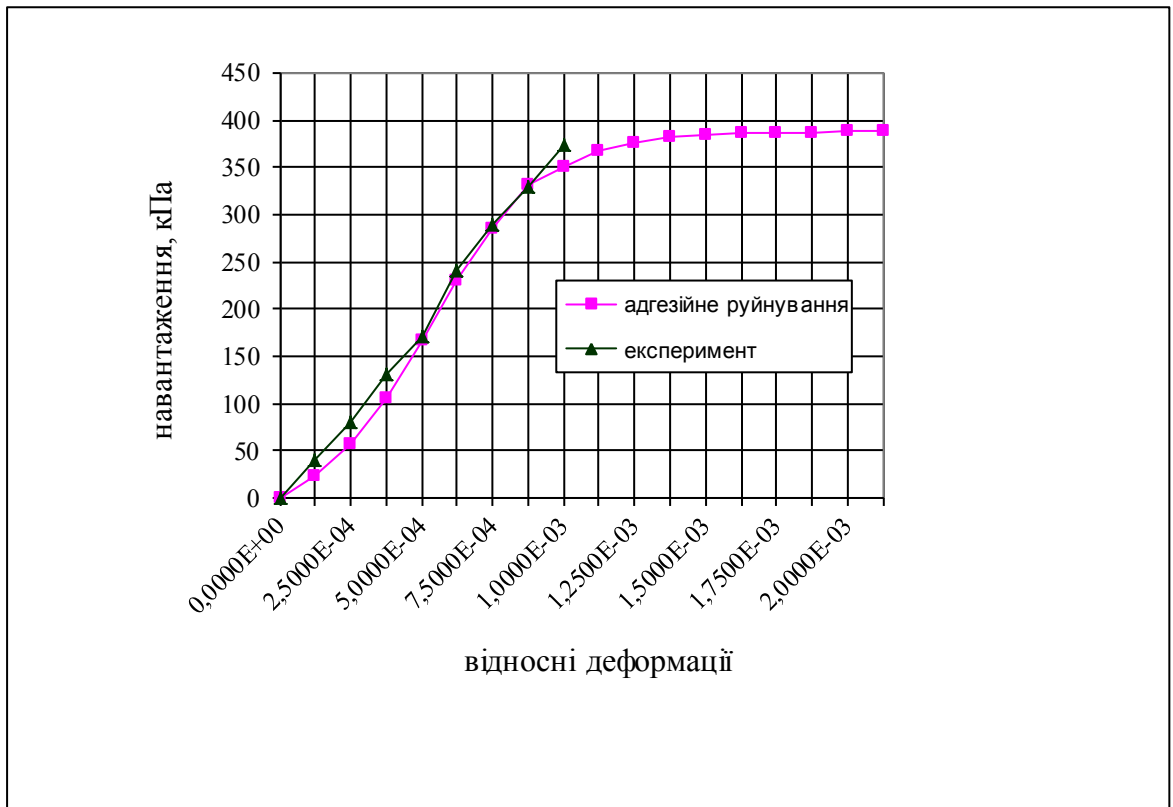


Рисунок 2. Навантаження-деформація для армованого ґрунту при $q=140$ кПа; $q_0=30$ кПа; $\nu=0,27$; $\mu=0,3$; $A_1=10,3$

Характеристики ґрунту: $q=140$ кПа, $\nu=0,27$. Коефіцієнт тертя арматурного елемента по ґрунту $\mu=0,3$ та $q_0=30$ кПа (прийmemo $\beta =1$). Як видно з рис. 2 на початковому етапі навантаження (до 40 кПа) кореляція теоретичних та експериментальних даних не дуже висока, при подальшому збільшенні навантаження вона значно покращується. Це пояснюється впливом першої ділянки теоретичної кривої, що має опуклість вниз. При збільшенні q_0 кореляція покращується і на початку навантаження.

Розглянемо розрахунок армованої основи на базі дискретної моделі. Введення горизонтально розташованих арматурних елементів в ґрунт подушки підвищує її жорсткість. При чому збільшення шарів арматурних елементів веде відповідно до збільшення жорсткості основи, тобто зменшення її осадки, але ця залежність має затухаючий характер – при досягненні певної кількості шарів, зазвичай 3...5, подальше збільшення жорсткості не суттєве.

Збільшення жорсткості основи відбувається за рахунок розподілення арматурними елементами навантаження на більшу площу. При багат шаровому армуванні відбувається перерозподіл навантаження між арматурними елементами. В цьому випадку, кожний шар можна приймати за подошву умовного гнучкого фундаменту з розрахунковою шириною, яка визначається з врахуванням розподілення напружень згідно статички сипучого середовища.

Згідно [6] розрив арматурних елементів відбувається поблизу торців фундаменту, а з глибиною відстань від торців збільшується. Цей встановлений натурними спостереженнями факт та факт перерозподілу напружень між арматурними елементами дають підставу, використовуючи відомі положення статички сипучого середовища висунути такі припущення: 1) перший арматурний елемент, горизонтально розташований на глибині h_1 нижче подошви фундаменту (рис. 3.3), розривається в точках перетину його з прямою, що виходить з кута фундаменту і відхилена від вертикалі на кут:

$$\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \quad (\text{де } \varphi - \text{кут внутрішнього тертя ґрунту засипки})$$

2) навантаження, що передається на арматурний елемент, який розміщений нижче, від арматурного елемента, який розміщений вище, як від умовного фундаменту шириною $L_i - 1$, при цьому потенційні точки розриву знаходяться в місцях перетину прямої, що виходить з кутової точки умовного фундаменту та відхилена від вертикалі на кут (рис. 3)

$$\frac{\pi}{4} - \left(\frac{\varphi}{2} - (i-1)\psi \right) \quad (\psi - \text{кут, який враховує перерозподіл навантаження між арматурними елементами, згідно [7] в середньому рівний } 3^\circ).$$

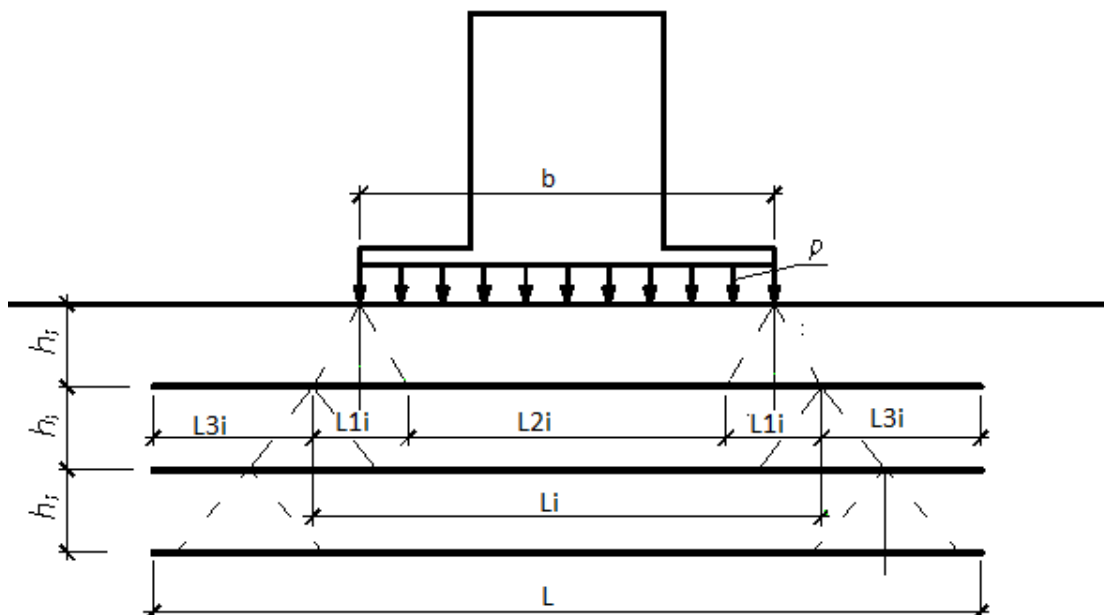


Рисунок 3. Схема для визначення потенційних точок розриву.

Розглядаємо наведену схему. Арматурний елемент проходить через дві характерні ділянки: 1) на першій, що є зоною активної дії навантаження від фундаменту, діють сили, що виводять із стану рівноваги арматурний елемент та одночасно сили, що його утримують; границі цієї ділянки визначають зазначені прямі (рис. 3), а довжина відповідно для першого та наступних шарів арматурних елементів становить:

$$l_1 = b + 2h_1 \times \operatorname{tg}(\pi/4 - \varphi/2) \quad (15)$$

$$l_i = l_{i-1} + 2h_i \times \operatorname{tg}(\pi/4 - (\varphi/2 - (i-1)\nu)) \quad (16)$$

2) друга ділянка, що проходить поза твірними конуса, є зоною пасивного навантаження, де навантаження від фундаменту відсутнє, але, де діють виключно утримуючі сили.

Для визначення, який з зазначених вище двох типів руйнування може статися, необхідно визначити розтягуючі та утримуючі сили, що діють у арматурних елементах, для чого потрібно знайти, яку частину прикладеного навантаження сприймають на себе арматурні елементи, а яка частина передається на шари ґрунту подушки та слабого ґрунту.

Розрахунок армованої основи на розрив або не проковзування арматурних елементів. Оскільки арматурні елементи гнучкі, не мають початкового прогину і працюють тільки на розтяг, то їх можна змоделювати гнучкими пружними нитками з нульовим прогином, закріплених на жорстких опорах. Таку модель можна використовувати при вирішенні зазначеної вище задачі про розподіл навантажень між ґрунтом та арматурними елементами. В цьому випадку робота ґрунту та арматурних елементів в армомасиві розглядається за принципом суперпозиції, що виключає потребу розглядати арматурні елементи, як конструкцію на пружних опорах.

Згідно [2] пружній розпір для нитки з нульовим прогином буде:

$$H_{y,i} = \sqrt[3]{\frac{DE_a F_a}{3l_i}}, \quad \text{де, } D = \int_0^l Q^2 dx \quad (17)$$

Q – еюра поперечних сил; E_a – модуль пружності арматурних елементів, кПа; F_a – площа поперечного перерізу арматурних елементів, м²; l_i – довжина арматурних елементів в активній ділянці на i -му горизонті, м.

В межах активної ділянки напруження на арматурний елемент змінюється по закону трапеції. Але в центральній ділянці довжиною L_2 , напруження постійне, на периферійних ділянках довжиною L_1 – змінне. Оскільки на ділянці довжиною L_2 деформування арматурного елемента не відбувається, так як він жорстко затиснутий через значні нормальні напруження, а відповідно і сили тертя (тобто ґрунт та арматурний елемент переміщуються разом), то з урахуванням цього прямокутне розподілене навантаження на ділянці довжиною L_2 відносимо до утримуючих сил, тоді еквівалентне навантаження на арматурні елементи буде розподілене у вигляді трикутників на ділянках довжиною L_1 рис. 4.

Знайдемо D при такому розподілі навантаження. Реакції опор та довжини характерних ділянок знайдемо згідно схем представлених на рис. 4 відповідно

$$R_A = R_B = q \frac{l_{1,i}}{2},$$

$$l_{2,1} = \frac{b \times \operatorname{tg}(\pi/4 + \varphi/2) - 2h_1}{\operatorname{tg}(\pi/4 + \varphi/2)}, \quad (18)$$

$$l_{2,i} = l_i - 4h_i \operatorname{tg}(\pi/4 - (\varphi/2 - (i-1)\nu)), \quad (19)$$

$$l_{1,i} = 0.5(l_i - l_{2,i}) \quad (20)$$

Для початку розглянемо лише один шар арматурного елемента та половину прольоту симетрично завантаженої нитки

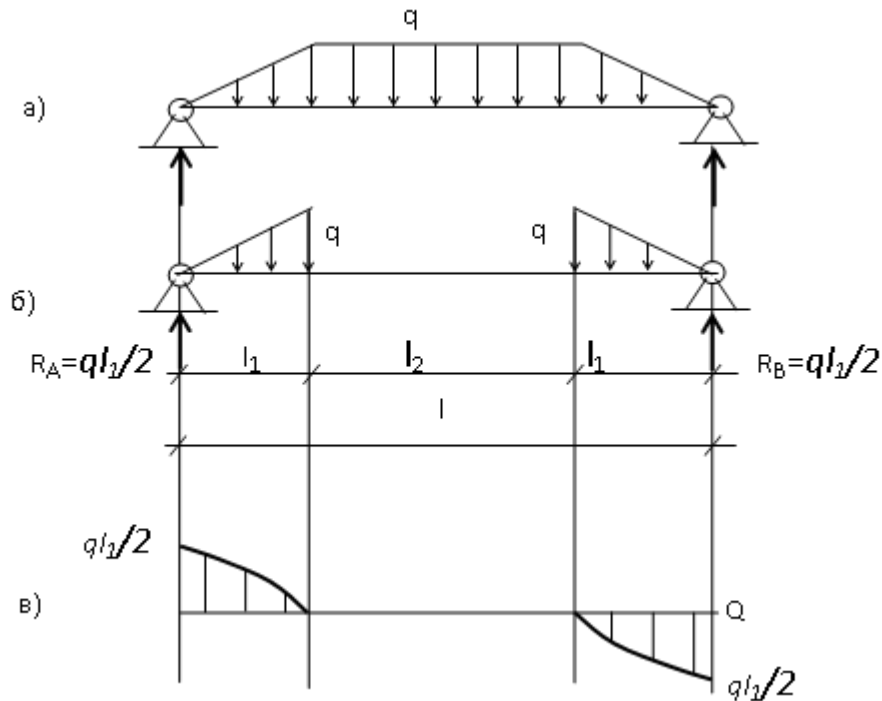


Рисунок 4. Розрахункові схеми з початковим (а) та еквівалентним (б) навантаженням, і епюра поперечних сил для еквівалентного навантаження (в).

$$D = 2 \int_0^{l_1} \left(R_A - 0.5 \frac{qx^2}{l_1} \right)^2 dx =$$

$$= 2 \int_0^{l_1} \left(R_A^2 - R_A \frac{qx^2}{l_1} + \frac{q^2 x^4}{4l_1^2} \right) dx = 2 \left(R_A^2 x - R_A \frac{qx^3}{3l_1} + \frac{q^2 x^5}{20l_1^2} \right)_0^{l_1} =$$

$$= 2R_A^2 l_1 - \frac{2R_A q l_1^2}{3} + \frac{q^2 l_1^3}{10} = 2q^2 \frac{l_1^2}{4} l_1 - 2q \frac{l_1}{2} \frac{q l_1^2}{3} + \frac{q^2 l_1^3}{10} =$$

$$= q^3 l_1^3 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \frac{1}{10} \right) = \frac{4}{15} q^3 l_1^3,$$

в загальному вигляді параметр D можна записати, позначивши

$$L_0 = \frac{4}{15} l_1^3, \quad (21)$$

$$D = q^2 L_0. \quad (22)$$

У формулі (22) q – розподілене у формі трикутника по довжині l_1 навантаження. Щоб перейти до навантаження, розподіленого по площі арматурного елемента, необхідно навантаження поділити на його ширину b_a , або $p_{a,p} \times b_a = q$. Пружній розпір арматурного елемента, після підстановки (22) в (17), з врахуванням $p_{a,p}$

$$H_y = \sqrt[3]{\frac{p_{a,p}^2 b_a^2 L_0 E_a F_a}{3l}}, \quad (23)$$

$$\frac{H_y}{b_a} = \sqrt[3]{\frac{p_{a,p}^2 L_0 E_a t_a}{3l}}. \quad (24)$$

При навантаженні арматурний елемент деформується у формі деякої кривої, його видовження станеться за рахунок пружних деформацій. Зв'язок між осадкою армованої основи та пружним видовженням арматурного елемента, використовуючи рівняння для

знаходження довжини дуги, в загальному випадку можна представити у вигляді:

$$L_1 = l + \frac{1}{2H^2} \int_0^l Q^2 dx,$$

$$\Delta l = \frac{1}{2H^2} \int_0^l Q^2 dx, \quad (25)$$

де H – жорсткий розпір арматурного елемента (нитки), який для еквівалентного навантаження (рис. 4, б) дорівнює

$$H = \frac{M_{0.5l}}{f} = \frac{q l_1^2}{f 3}$$

нехай $L = \frac{l_1^2}{3},$ (26)

$$H = \frac{qL}{f} = \frac{qL}{s_a}, \quad (27)$$

де $s_a = f$ – осадка армованої основи (f – стрілка прогину нитки);
 $M_{0.5l}$ – максимальний згинальний момент, що діє посередині балки, яка еквівалента пружній нитці.

Підставляючи (22) та (27) в (25) отримаємо

$$\Delta l = \frac{s_a^2}{2q^2 L^2} q^2 L_0 = \frac{s_a^2 L_0}{2L^2}. \quad (28)$$

Оскільки арматурний елемент та ґрунт деформуються разом, то при певному значенні величини осадки, яка зумовлена прикладеним навантаженням, що менше граничного тиску на армований ґрунт, в цій системі наступить стан рівноваги, за яким частину навантаження сприйме на себе ґрунт, а частину арматурний елемент. Зв'язок між навантаженням та осадкою для арматурного елемента одержимо за законом Гука, а для ґрунту використаємо метод еквівалентного шару [8]. Навантаження, що діє на один арматурний елемент, враховуючи (23) та (28).

$$\Delta l = \frac{H_y l}{F_a E_a} = \sqrt[3]{\frac{p_a^2 b_a^2 L_0 E_a F_a}{3l} \frac{l}{E_a F_a}},$$

$$\frac{\Delta l E_a F_a}{l} = \sqrt[3]{\frac{p_a^2 b_a^2 L_0 E_a F_a}{3l}},$$

$$\frac{\Delta l^3 E_a^3 F_a^3}{l^3} = \frac{p_a^2 b_a^2 L_0 E_a F_a}{3l},$$

$$p_a^2 = \frac{3l \Delta l^3 E_a^3 F_a^3}{l^3 b_a^2 L_0 E_a F_a} = \frac{3 \Delta l^3 E_a^2 F_a^2}{l^2 b_a^2 L_0} = \frac{3 \Delta l^3 E_a^2 t_a^2}{l^2 L_0} = \frac{3 E_a^2 t_a^2 \left(\frac{s_a^2 L_0}{2L^2} \right)^3}{8 l^2 L^6},$$

$$p_a = \frac{\sqrt{3} E_a t_a L_0}{2 \sqrt{2} l^3} s_a^3. \quad (29)$$

Для арматурного елемента у вигляді стрічок та сіток необхідно вводити коефіцієнт концентрації: для стрічок - $\alpha = b_a / d$, а для сіток $\alpha = F_{cmp} / (d l_{uc})$ де d – відстань між осями паралельних стрічок чи ширина чарунки сітки між осями повздовжніх елементів сітки, F_{cmp} – площа елементів сітки, які попадають в обриси чарунки сітки по вісям повздовжніх та поперечних елементів, l_{uc} – довжина чарунки сітки між осями поперечних елементів сітки, а для арматурних елементів у вигляді суцільних матеріалів даний коефіцієнт дорівнює 1.

Для випадку багат шарового армування (k – кількість шарів) навантаження, що

сприймуть на себе арматурні елементи

$$\sum_{i=1}^k p_{a,pi} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha E_a t_a}{2\sqrt{2}} \sum_{i=1}^k \frac{L_{0i}}{l_i L_i^3} \right) s_a^3. \quad (30)$$

Навантаження, що сприймає на себе ґрунт розраховуємо по методу еквівалентного шару ґрунту Цитовича

$$p_z = \frac{1}{m_v h_3} s_a, \quad (31)$$

де $m_v = \frac{\beta}{\kappa E_{zp}}$ - коефіцієнт стисливості ґрунту, м²/кН;

$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}$ - коефіцієнт, що характеризує бокове розширення ґрунту;

ν - середньозважений коефіцієнт відносної поперечної деформації для ґрунтів на глибину h_3 від подошви фундаменту;

$h_3 = A\omega b$ - потужність еквівалентного шару ґрунту, м;

$A\omega$ - коефіцієнт еквівалентного шару для всієї завантаженої площі, що приймається по таблиці Г.1 при визначенні максимальних осадок $A\omega_0$ та середніх осадок $A\omega_m$, або по таблиці Г.2 при визначенні осадок в куткових точках;

b - ширина фундаменту, м;

E_{zp} - середньозважений модуль загальної деформації ґрунтів на глибину h_3 від подошви фундаменту, кПа;

κ' - поправочний коефіцієнт, який визначається з умови рівності осадки, яка порахована за методом еквівалентного шару, осадці, яка порахована за методом пошарового підсумовування.

Так як частину навантаження на себе сприймають арматурні елементи, а частину ґрунт подушки та слабкий ґрунт, то їх сума буде дорівнювати прикладеному навантаженню, або можна записати:

$$\left(\frac{\sqrt{3}\alpha E_a t_a}{2\sqrt{2}} \sum_{i=1}^k \frac{L_{0,i}}{l_i L_i^3} \right) s_a^3 + \frac{1}{m_v h_3} s_a - p = 0 \quad (32)$$

Розв'язуючи рівняння (32), знаходимо значення осадки армованої основи при заданих фізико-механічних характеристиках арматурних елементів та ґрунту. Потім вирішуємо зворотну задачу, знаходимо за формулою (30) та (24) відповідно навантаження, яке сприйняли арматурні елементи, та пружний розпір в арматурних елементах, який прирівнюємо до допустимого опору арматурних елементів розтягу $[R_s]$, кН/м. Якщо він менший, то умова міцності арматурного елемента задовольняється, якщо більший – то ні. Значення величини розпору може також слугувати показником виду руйнування армованої основи.

Висновки

1. Статистичний метод розрахунку дає можливість врахувати особливості роботи армованої основи (збільшення несучої здатності у порівнянні з не армованою, збільшення міцності при збільшенні кількості шарів арматурних елементів і т.д.) та визначити осадку армованої основи при двох видах її руйнування для загальної оцінки ефективності використання методу армування. До переваг методу належить нелінійний зв'язок між навантаженням та відносною осадкою, але для розрахунку арматурних елементів цього методу не достатньо тому було вирішено розробити метод, який базується на дискретній моделі.

2. Метод розрахунку, який базується на дискретній моделі, дає можливість розраховувати армовану основу при розриві та проковзуванні арматурних елементів,

максимально враховуючи фізико-механічні характеристики, як ґрунту так і арматурних елементів, а також можливо розрахувати проковзування арматурних елементів у ґрунті подушки, тобто він використовується для детального розрахунку армованої основи – визначення осадки, величини проковзування арматурних елементів, їх розмірів та міцності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Друкований М.Ф., Дудар І.Н., Корчевський Б.Б., Ковальський Р.К. Фактори, що впливають на ефективність армування ґрунту // Вісник ВПП. – 2001. - №5. – с. 22 – 27.
2. Ковальський Р.К. Зміцнення ґрунтових основ будівель та споруд методом армування: Автореферат дисертації канд. техн. наук: 05.23.02 / Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій – Київ, 2004 – 18 с.
3. Корчевський Б.Б. Влаштування армованих основ під фундаментами будівель: Автореферат дисертації канд. техн. наук: 05.23.02 / Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій – Київ, 2002 – 16 с.
4. Корчевський Б.Б., Шевченко А.В. Визначення напружень в армованій основі зусиль в арматурних елементах і відстані між ними // Науково-технічний журнал «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». -Вінниця:ВНТУ, 2021, -с.28-33.
5. Баников С.Н. Деформативність та стійкість армованих основ // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК. – 2000. - №53. – с. 19 – 24.
6. Binquet I. and Lee K.L. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs // Proc. ASCE, journal of the Geotechnical engineering Division, 101: GT 12. – p. 1241-1255.
7. Хамдан Фуад Ахмед. Підвищення несучої спроможності глинистих ґрунтів методом армування базальтовим волокном: Дис... канд. техн. наук: 05.23.02 / КІБІ. – К., 1990. – 150 с.
8. Черний Г.І., Ковальський Р.К., Шаповал А.В. Особливості визначення напружено-деформованого стану армованих ґрунтових основ з використанням методу кінцевих елементів // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК. – 2001. - № 55. - с. 159 – 172.