МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ СХИЛІВ І ПІДПІРНИХ СТІН

Методичні вказівки
для виконання розрахункової роботи з дисципліни
«Спецкурс випускової кафедри»
для студентів спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Київ 2024

УДК 624
Р64

Укладач О. В. Малишев, канд. техн. наук, доцент

Рецензент Л. О. Бондарева, канд. техн. наук.

Відповідальний за випуск І.П. Бойко, д-р техн. наук, професор

Затверджено на засіданні кафедри геотехніки, протокол № 18 від 3 квітня 2023 року.

В авторській редакції.

Розрахунок стійкості схилів та підпірних стін: методичні вказівки
Р64 / уклад. О. В. Малишев. – Київ.: КНУБА, 2024. – 36 с.

Розглянуто методи розрахунку стійкості підпірних стін, укосів, схилів у сухих і зволожених ґрунтах.

Призначено для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

© КНУБА 2024

ЗМІСТ

Загальні положення 4
1. Загальна характеристика умов стійкості 4
2. Розрахунок стійкості схилів за методом круглоциліндрічної поверхні ковзання в ґрунтах природної вологості 7
3. Розрахунок стійкості укосів за методом круглоциліндричної поверхні ковзання за наявності рівня ґрунтових вод 14
4. Розрахунок стійкості укосу за методом рівноміцного схилу 20
5. Визначення коефіцієнта стійкості основи підпірних стін за круглоциліндричними поверхнями ковзання 24
Список літератури 34

Загальні положення

Будівництво підземних споруд відкритим способом може здійснюватися без кріплення бортів котловану, проте з дотриманням вимог щодо кута природнього укосу грунту. Таке рішення є простим та надійним, проте не завжди ефективним, оскільки значна частина будівельних робіт виконується в умовах міської забудови, яка створює обмеження щодо розмірів будівельного майданчика. Додатково використання такого способу ускладнює наявність зовнішніх, особливо гідрогеологічних факторів, що мають бути враховані в теоретичних методах розрахунку шляхом їх врахування в якості фізико-геологічних і механічних впливів.

Основна мета видання методичних вказівок – навчити студента самостійно виконувати розрахунки стійкості ґрунтових масивів або підпірних стін, та вміти аналізувати отримані результати.

Нині в нормативній та технічній документації наведено велику кількість положень та рекомендацій, щодо оцінки стійкості укосів, схилів, насипів, виїмок та котлованів. Водночас як у студентів, так і у проєктувальників можуть виникати певні труднощі. Саме тому основними задачами під час освоєння цієї теми є: аналіз ґрунтових умов, правильний вибір методу розрахунку з урахуванням виду та стану ґрунту, вміння складати та користуватися розрахунковими схемами, визначати стійкість підпірних стін, аналізувати результати розрахунків і складати висновків щодо можливості використання запропонованих конструктивних рішень.

1. Загальна характеристика умов стійкості [4]

Рух земляних мас доволі широко розповсюджений у природі – від ледь помітного переміщення, яке відбувається неперервно, до катастрофічних обвалів і зсувів. Порушення стійкості ґрунтових масивів залежить як від загальних умов рівноваги, так і від фізико-механічних процесів, що відбуваються в ґрунтах. Нестійким буде називатися такий стан ґрунтового масиву, за якого незначні за величиною зовнішні впливи будуть його порушувати, що супроводжуватиметься зміною структури ґрунту, а рух всього масиву відбуватиметься до тієї межі, де буде досягнуто нового стану рівноваги. Такі переміщення відбуваються внаслідок подолання

опору зсуву по площинах, що утворюють в ґрунтовому масиві криволінійні поверхні ковзання.

Основними видами порушення стійкості ґрунтового масиву є: зсуви, обвали, опливини, видавлювання, вивали та осипи.

Зсуви, або так звані ковзання ґрунту, спостерігаються переважно у зв'язаних ґрунтах і обумовлюються змінами величини сил зчеплення. Скрізь, де в природних умовах існує різка зміна навантажень, наприклад за наявності котлованів, необхідних для влаштування фундаментів будівель або споруд, слід звертати увагу на можливість появи зсувних явищ. Зсуви – складне явище, яке являє собою сукупність окремих ковзань ґрунту, які виникають одне за одним. Ці окремі ковзання відбуваються в деякому взаємному зв'язку, і найбільше значення зсувної сили необхідна тільки для виникнення першого порушення рівноваги. Як тільки відбувається перший зсув, наступні зсуви виникають як наслідок першого, причому їх виникнення впливає і на стійкість мас ґрунту першого зсуву.

Інші види порушення стійкості масивів ґрунту, а саме обвали й опливини, спостерігаються здебільшого в гірських районах.

Обвали відрізняються від зсувів тим, що під час їх утворення деформації захоплюють значні за об'ємом масиви ґрунту і відбуваються дужу швидко. Обвали ґрунту виникають внаслідок тимчасового зменшення опору ґрунту зсувним зусиллям.

Опливини – це порушення стійкості мас ґрунту, що переходять в текучий стан. Чим більше вологи може утримати в собі ґрунт, тим більша його стійкість зсуву. За однакового водонасичення дрібнозернисті та пилуваті піщані ґрунти швидше стають рідкими, ніж зв'язні.

Видавлювання – це явище пластичної течії м'яких мас ґрунту. Під час видавлювання в чистому вигляді рух ґрунту відбувається відповідно до законів гідродинаміки, згідно з якими опір тертю збільшується у разі збільшення швидкості руху. Різниця між зсувами та обвалами, з одного боку, опливинами і видавлюванням, з іншого, полягає в тому, що для перших завжди спостерігаються криволінійні поверхні ковзання, тоді як в останніх явно виявлені поверхні ковзання не фіксуються, особливо якщо ґрунти знаходяться в рідкому стані.

Вивал – раптовий відрив і падіння окремих брил і блоків гірських порід з укосів виїмок, бортів кар'єрів, з крутих схилів, складених скельними або напівскельними ґрунтами.

Осипи – тривалий або тимчасовий і повільний рух накопичених на схилі уламкових продуктів вивітрювання, що містять щебінь і крупні кам’яні брили.

До основних факторів, що впливають на стійкість ґрунтових масивів можна віднести: зовнішні впливи, збільшення активної дії навантаження і зменшення опору ґрунту.

Зовнішніми впливами можуть бути: зменшення опору земляних мас, що розміщені на покрівлі похилого щільного шару ґрунту; розробка канав і котлованів, що прорізують слабкі шари, навантажені вагою вище лежачих шарів; підмив схилів і обривів водою. Ймовірність зменшення стійкості схилу збільшується із збільшенням кута нахилу щільного шару ґрунту, глибиною розробки пухких шарів, із збільшенням різниці щільності шарів ґрунту, які лежать вище тих шарів, що порушені зовнішніми механічними впливами.

Збільшення активної дії навантаження має суттєвий вплив на порушення стійкості ґрунтових масивів. Це збільшення може бути як в чистому вигляді, наприклад у разі влаштування штучних споруд, насипів, так і внаслідок зміни фізичного стану ґрунту і зусиль, що діють в ньому. Досить часто причиною зсувів і обвалів є збільшення ваги шарів ґрунту внаслідок насичення їх водою під час тривалих дощів або паводків. Якщо ґрунт був сухим, то, насичившись водою, він збільшує свою об'ємну вагу на величину ваги води, що заповнює пори.

Наявність бокових фільтраційних сил, або так званого гідродинамічного тиску води також погіршує умови стійкості ґрунтових масивів, особливо у разі влаштування виїмок. Гідродинамічний тиск у ґрунті, в якому фільтрується вода, дорівнює добутку питомої ваги води γ_w на гідравлічний градієнт в точці I, тобто:

$$D = \gamma_w I.$$

Форма поверхні ковзання має суттєве значення для статичних розрахунків стійкості ґрунтових масивів, тому під час проектування слід звертати увагу на встановлення характеру поверхні ковзання.

Експериментальні дані свідчать, що поверхні ковзання під час зсувів у однорідних ґрунтах мають криволінійний обрис в розрізі: у верхній точці напрямок кривої поверхні ковзання близький до вертикального, але у разі наближення до основи кут нахилу кривої до горизонту зменшується, наближаючись до нуля. Характер поверхні ковзання для однорідних

ґрунтів у розрізі близький до круглоциліндричної, в плані ж у більшості випадків вона має циркоподібну форму.

У випадку різнорідних нашарувань ґрунтів обрис поверхні ковзання переважно залежати від властивостей ґрунтів. Під час зсувів пухких ґрунтів, що підстеляються скельовими, поверхня ковзання в основному збігається з поверхнею скельових порід. У разі нашарування ґрунтів з різко вираженими різноманітними властивостями окремих шарів, поверхня ковзання може мати форму хвилеподібної кривої с криволінійною віссю. На обрисі поверхні ковзання відбиваються й динамічні зусилля, що виникають під час сповзання масивів ґрунту, що, наприклад, сприяє утворенню горбів сповзання у підніжжі укосів і схилів. Отже, обрис поверхні ковзання може мати різну форму.

Сьогодні в більшості інженерних задач на схилах, що складені дисперсними ґрунтами, розглядається процес механічного зміщення частини ґрунту, що знаходиться за межами площини граничної рівноваги, тобто відбувається розвиток зсувів.

2. Розрахунок стійкості схилів за методом круглоциліндричної поверхні ковзання в ґрунтах природної вологості [7]

В основу розрахунку за методом круглоциліндричної поверхні ковзання покладено співвідношення між моментами, що створюють утримувальні і перекидні сили, що діють на схил:

$$k_{st} = \frac{\sum M_{\text{ут}}}{\sum M_{\text{зс}}} = \frac{\sum(P_i \cdot \cos\alpha_i \cdot tg\varphi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum P_i \cdot \sin\alpha_i} \qquad (1)$$

де P_i – вага розрахункового блоку; α_i – кут між напрямом сили P_i і нормальної складової N_i; φ_i – кут внутрішнього тертя ґрунту; c_i – питоме зчеплення ґрунту; l_i – ширина розрахункового блоку.

Відповідно до будівельних норм [4] нормативне значення коефіцієнта стійкості схилу k_{st} характеризує мінімальний запас утримувальних сил по відношенню до сил зрушення і визначається з врахуванням коефіцієнтів надійності, умов роботи і сполучення навантажень:

$$k_{sn} = \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c},$$

де γ_n – коефіцієнт надійності, що враховує клас наслідків відповідальності об'єктів; γ_c – коефіцієнт умов роботи; γ_{fc} – коефіцієнт сполучення навантажень.

У разі досягнення граничного стану значення коефіцієнта стійкості при основному сполученні навантаження для зсувних та зсувонебезпечних схилів становить 1,35 та 1,25 – для СС3; 1,3 та 1,2 – для СС2; 1,2 та 1,1 – для СС1.

За методом круглоциліндричних поверхонь ковзання може бути розглянуто безліч варіантів, але в інженерних розрахунках їх кількість зменшують за рахунок попереднього призначення оптимальної точки центру обертання блоків ґрунту.

Розрахунок зводиться до визначення за формулою (1) круглоциліндричної поверхні ковзання з найменшим коефіцієнтом стійкості. Місце розташування першого центру обертання O_1 визначається за такою послідовністю (рис. 1).

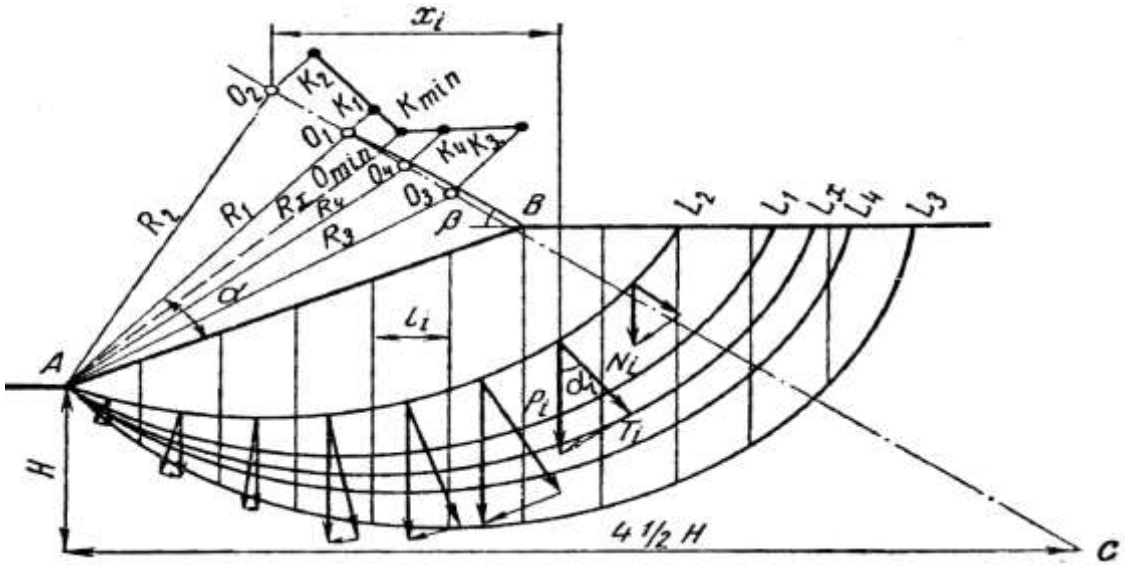

Рис.1. Розрахункова схема для визначення стійкості схилу за методом круглоциліндричної поверхні ковзання

Від підошви схилу (точка A) відкладають пряму під кутом α до схилу; із точки B (брівка схилу) проводять горизонталь і від цієї горизонталі відкладають кут β. Перетин ліній, відкладених під кутами α і β, приймають за точку O_1 – центр обертання першої круглоциліндричної поверхні ковзання. Величина кутів α і β береться залежно від величини закладення укосу за даними табл. 1.

Таблиця 1

Ухил укосу	α, град	β, град
1,73:1	29	40
1:1	28	37
1:1,5	26	35
1:2	25	35
1:3	25	35
1:5	25	37

Об`єм ґрунту в межах круглоциліндричної поверхні ковзання розбивається на призми (блоки) за рахунок вертикальних перерізів. На кожний блок діють такі сили (рис. 1):

- сила P_i, прикладена в центрі ваги кожного блоку, дорівнює власній вазі блока;
- реакція нерухомої частини ґрунту на поверхні ковзання, що складається із сили тертя, яке визначається як сума нормального тиску ґрунту, тобто $N \cdot tg\varphi$ (де N – нормальна складова сила ваги блока P, φ - кут внутрішнього тертя ґрунту), і сили зчеплення, що дорівнює добутку величини зчеплення c на довжину відрізка дуги ковзання відповідного елемента;
- зсуваюча сила T, що діє по лінії дотичної до поверхні ковзання в кожному блоці.

Після того як розраховано коефіцієнт стійкості по першій кривій ковзання з центром обертання O_1 інші центри обертання знаходять за такою послідовністю.

Нижче підошви схилу на глибині, рівній висоті укосу H, від точки A (підошва укосу) по горизонталі відкладають відстань 4,5 H і одержують точку C. З'єднуючи точку C з центром обертання першої дуги ковзання O_1, одержують пряму, на якій варто розташовувати усі центри обертання, що досліджуються (рис. 1.). Найбільш ймовірне положення центра обертання з найменшим коефіцієнтом запасу стійкості буде на цій прямій у районі положення точки O_1.

Проте запропонований розрахунок по визначенню положення центра обертання з найменшим коефіцієнтом стійкості є трудомістким. Для його спрощення Н. Янбу запропонував графік (рис. 2.), що дає можливість відразу визначити положення центра обертання найбільш небезпечної кривої ковзання.

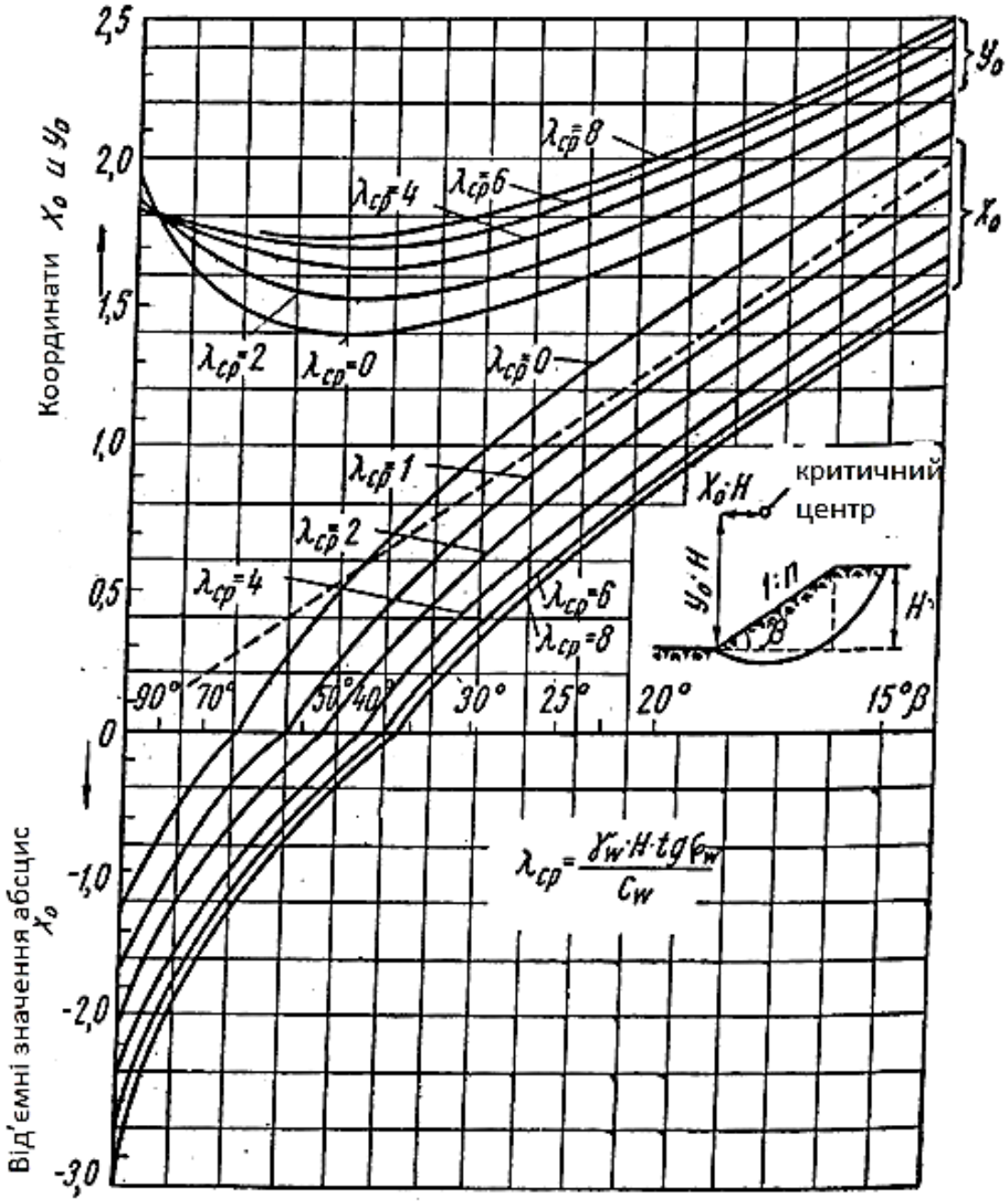

Рис. 2. Діаграма Янбу для визначення координат центру найбільш небезпечної кривої ковзання

Крім того, без великої похибки (близько 10 % у бік завищення коефіцієнта стійкості), приймаючи $cos\alpha = 1$, формула (1) може бути записана в простішому виді:

$$k_{st} = \frac{\sum P_i \cdot tg\varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_i \cdot x_i} R, \qquad (2)$$

де R – радіус круглоциліндричної дуги ковзання; x_i – плече від лінії дії центру ваги блоку до центра обертання (див. рис. 1).

За однорідної товщи ґрунту схилу складова рівняння (2) $\sum c_i \cdot l_i$ може бути записана у вигляді:

$$\sum c_i \cdot l_i = cL,$$

де L – довжина дуги ковзання.

Приклад 1. Необхідно запроєктувати котлован глибиною 10 м у суглинках, що мають наступні характеристики: питома вага ґрунту γ = 19,0 кН/м^3, кут внутрішнього тертя φ = 17°, питоме зчеплення c = 16,3 кПа. Питома вага ґрунту у виваженому стані γ' =10 кн/м^3. Укоси котловану проектуються висотою H = 10 м із закладенням 1:1,5.

1. Розрахунок стійкості укосу виконуємо за спрощеною формулою (2).

Після виконання у визначеному масштабі креслення укосу за графіком Н. Янбу (див. рис. 2) знаходять положення центра кривої ковзання з найменшим коефіцієнтом стійкості.

Для того, щоб знайти координати центру кривої ковзання, попередньо визначають $\lambda_{\text{ср}}$:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\gamma\ H\ tg\varphi}{c} = \frac{19.0 \cdot 10\ \cdot tg17°}{16{,}3} = 3.$$

За визначеним значенням $\lambda_{\text{ср}}$ = 3 і кутом схилу β = 33°47' (закладання укосу 1:1,5) за графіком Янбу знаходять значення x_0 і y_0:

$$x_0 = 0.5, y_0 = 16.$$

Тоді координати центру обертання O дорівнюють:

$$x = x_0 \cdot H = 0{,}35 \cdot 10 = 3{,}5 \text{ м};$$

$$y = y_0 \cdot H = 1{,}60 \cdot 10 = 16 \text{ м}.$$

Відкладаючи від підошви укосу вгору 16 м і праворуч 3,5 м (рис. 3), отримуємо положення точки O – центр обертання.

Зі знайденого центра обертання через підошву укосу проводимо дугу поверхні ковзання. Графічно, по масштабу (або аналітично), визначаємо радіус кривої ковзання:

$$R = 16{,}4 \text{ м}.$$

Розбиваємо зсувне тіло на блоки (рис. 3), графічно визначаємо ширину і висоту їх сторін, виконуємо розрахунок всіх необхідних елементів, що входять у формулу (2).

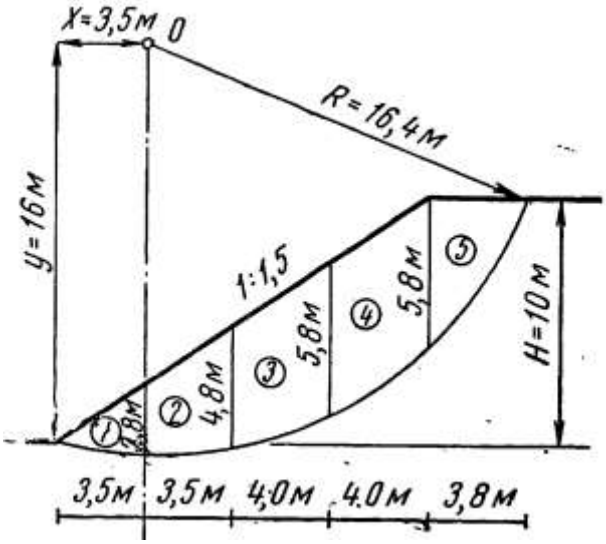

Рис. 3. Розрахункова схема для визначення стійкості схилу за методом круглоциліндричної поверхні ковзання в ґрунтах природньої вологості

Наприклад, для блоку 1:

а) площа блоку:

$A_1 = (3{,}5 \times 2{,}8) / 2 = 4{,}9$ м2; об'єм $4{,}92 \cdot 1{,}0 = 4{,}9$ м^3;

б) вага блоку:

$$P_1 = 4{,}9 \cdot 19{,}0 = 93 \text{ кН};$$

в) плече центру ваги блоку відносно точки обертання *O*:

$$x_1 = -3{,}5 / 3 = -1{,}18 \text{ м};$$

г) момент від ваги блоку відносно точки обертання *O*:

$$x_1 P_1 = -1{,}18 \cdot 93{,}0 = 110 \text{ кНм}.$$

Момент береться від'ємним для висхідної гілки кривої ковзання. Для спадаючої гілки кривої ковзання моменти позитивні. В умовах прикладу моменти від ваги блоків 2, 3, 4 та 5 – позитивні.

Дані розрахунків зведено до табл. 2.

Таблиця 2

№ блоку	Середня висота блоку, м	Ширина блоку, м	Об'єм блоку V_i, м^3	Вага блоку P_i, кН	Плече x_i, м	Момент $P_i x_i$, кНм
1	1,4	3,5	4,9	93,0	-1,2	-110,0
2	3,8	3,5	12,3	234,0	1,8	420,0
3	5,3	4,0	21,2	402,0	5,5	2200,0
4	5,8	4,0	23,0	440,0	9,5	4180,0
5	2,9	3,8	11,0	209,0	12,8	2680,0
			$\sum P_i = 1378.0$		$\sum P_i x_i = 9590.0$	

Визначаємо довжину дуги ковзання L:

а) $sin\,\beta 1 = 3{,}5 / 16{,}4 = 0{,}213$; $\beta 1 = 12°18'$;

б) $sin\,\beta 2 = 15{,}5 / 16{,}4 = 0{,}945$; $\beta 2 = 70°54'$.

$\beta 1 + \beta 2 = 83°12'$ або в радіанах $arc\,83°12' = 1{,}45$.

Довжина дуги $L = 16{,}4 \cdot 1{,}45 = 23{,}8$ м.

Коефіцієнт стійкості відповідно до формули (2) становить:

$$k_{st} = \frac{tg\varphi \sum P_i + c\,L}{\sum P_i \cdot x_i} = \frac{0{,}31 \cdot 1378{,}0 + 16{,}3 \cdot 23{,}8}{9590{,}0} \cdot 16{,}4 = 1{,}39.$$

Будь-яка інша крива ковзання буде мати коефіцієнт стійкості більший, ніж отриманий

k_{st} = 1,39 > 1,20 – стійкість укосу забезпечена.

Приклад 2. Розрахунок стійкості укосу за формулою (1) з урахуванням кута α.

Для встановлення точності, обчисленого за формулою (2) запасу коефіцієнта стійкості, розраховуємо його за тією ж круглоциліндричною поверхнею ковзання відповідно до формули (1). Для цього слід розрахувати значення кута α – кута нахилу дотичної до поверхні ковзання, чисельно рівного куту, утвореному вертикально з радіусом-вектором R, проведеним через точку прикладання ваги блоку (див. рис.1).

Наприклад, для блоку 4 кут α_4 визначається з виразу:

$$sin\alpha_4 = 9{,}5/16{,}4 = 0{,}58,$$

$$\cos\alpha_4 = 13{,}35/16{,}4 = 0{,}81,$$

і так для кожного з виділених блоків. Всі розрахункові дані зведені до табл. 3.

Таблиця 3

№ блоку	Вага блоку P_i, кН	$sin\,\alpha_i$	$cos\,\alpha_i$	$P_i \sin\alpha_i$, кН	$P_i\,cos\,\alpha_i\,tg\varphi_i$, кН
1	93,0	-0,07	1,00	-6,5	28,8
2	234,0	0,11	0,99	25,8	72,0
3	402,0	0,34	0,94	137,0	117,0
4	440,0	0,58	0,81	256,0	110,2
5	209,0	0,78	0,63	163,0	40,9
			$\sum P_i sin\,\alpha_i$ =575,3		$\sum P_i\,cos\,\alpha_i\,tg\varphi_i = 368{,}9$

Отже, коефіцієнт стійкості дорівнюватиме:

$$k_{st} = \frac{368{,}9 + 16{,}3 \cdot 23{,}80}{575{,}3} = 1{,}32.$$

Відсоток похибки Δ спрощеної формули (2) по відношенню до результату за формулою (1) становить:

$$\Delta = \frac{1.39 - 1.32}{1.32} \times 100 = 7\ \%.$$

3. Розрахунок стійкості укосів за методом круглоциліндричної поверхні ковзання за наявності рівня ґрунтових вод [7]

Якщо зі схилу просочуються ґрунтові води, то в умовах плоскої задачі фільтраційний тиск дорівнюватиме

$$W_{\Phi} = \omega I \gamma_w, \tag{3}$$

де ω – об'єм фільтраційного потоку в межах зсувного тіла (рис. 4); I – гідравлічний градієнт; γ_w– питома вага води.

Рис. 4. Розрахункова схема для врахування фільтраційного тиску ґрунтових вод на схил

Однак для того щоб в умовах круглоциліндричної поверхні ковзання скористатися формулою (3), необхідно знати момент фільтраційного тиску відносно центра обертання, що має деякі труднощі у зв'язку зі складністю обрису фільтраційного потоку в межах зсувного тіла. Тому при дії на схил фільтраційного потоку використовуються такі формули:

$$k_{st,\text{ф}} = \frac{\sum P_{\text{В}} \cdot \cos\alpha_i \cdot tg\varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_i \cdot \sin\alpha_i}, \tag{4}$$

або

$$k_{st,ф} = \frac{\sum P_i \cdot \cos\alpha_i \cdot tg\varphi_В + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_i \cdot \sin\alpha_i}, \quad (5)$$

а замість формули (2):

$$k_{st} = \frac{\sum P_i \cdot tg\varphi_В + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_i \cdot x_i} R. \quad (6)$$

У разі водонасичення схилу:

$$k_{st} = \frac{\sum P_В \cdot \cos\alpha_i \cdot tg\varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_В \cdot \sin\alpha_i}, \quad (7)$$

або беручи $\cos\alpha_i = 1$:

$$k_{st} = \frac{\sum P_В \cdot tg\varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum P_В \cdot x_i} R. \quad (8)$$

Формули (5), (6) враховують фільтраційний тиск на схил через фіктивний кут внутрішнього тертя $\varphi_В$.

У формулах (5 – 8) позначення ті ж самі, що і у формулах (1, 2); $P_В$ – вага блоку з урахуванням ваги ґрунту у виваженому стані; $\varphi_В$ – фіктивний кут тертя, рівний:

$$tg\varphi_В = \beta tg\varphi;$$

$$\beta = \frac{a + \frac{b}{2} + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}}{a + b + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}}, \quad (9)$$

де a – середня висота сухої зони блоку (рис. 5); b – середня висота блоку в зоні фільтраційного тиску; c – середня висота блоку в зоні затоплення; d – середня висота блоку в зоні застою.

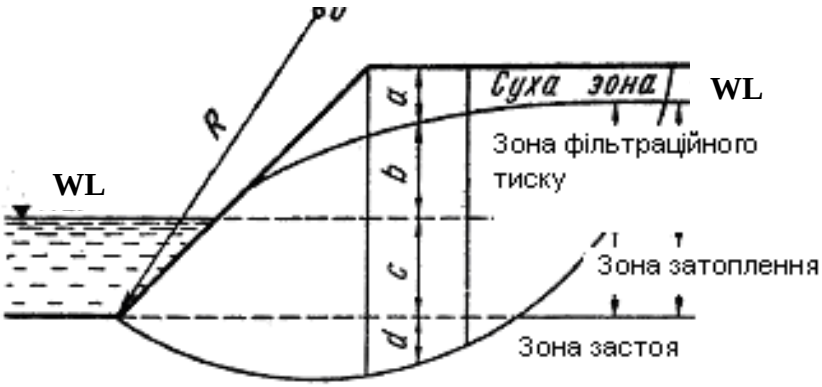

Рис. 5. Розрахункова схема для визначення коефіцієнта β з урахуванням фільтраційного тиску ґрунтових вод для розрахунку схилу за методом круглоциліндричної поверхні ковзання

Приклад 3. Розрахунок стійкості затопленого укосу на висоту 8 м. Розрахунок ведеться так само, як і у випадку незатопленого укосу, але вага блоків береться з урахуванням виваженого стану ґрунту відповідно до формули (8).

Розрахункова схема показана на рис. 6. Для того, щоб визначити положення центра обертання за графіком Янбу в умовах затопленого укосу, слід обчислити середньозважене значення питомої ваги ґрунту.

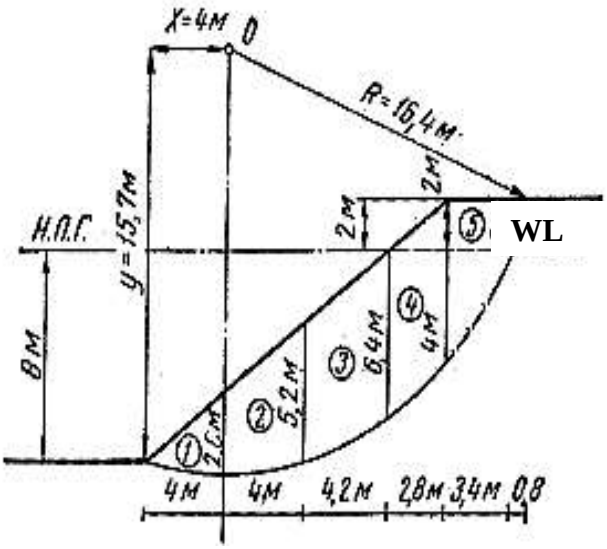

Рис. 6. Розрахункова схема до визначення стійкості затопленого укосу за методом круглоциліндричної поверхні ковзання

Верхні 2 м сухого укосу мають питому вагу $\gamma = 19{,}0$ кН/м^3, нижні 8 м затопленого укосу – $\gamma = 10{,}0$ кН/м^3.

Тоді

$$\gamma'_{cp} = \frac{8 \cdot 10 + 2 \cdot 19.0}{10} = 11{,}8 \text{ кН/м}^3.$$

Коефіцієнт λ_{cp} графіку Янбу дорівнює:

$$\lambda_{cp} = \frac{\gamma'_{cp}\, H\, tg\varphi}{c} = \frac{11{,}8 \cdot 10 \cdot 0{,}31}{16{,}3} = 2{,}2 \text{ кН/м}^3.$$

Для $\lambda_{cp} = 2{,}2$ і кута закладання укосу $\beta = 33°47'$ визначаємо значення умовних координат:

$$x_0 = 0{,}4; \quad y_0 = 1{,}57.$$

Значення координат центра обертання становлять:

$$X = X_0$$

$$H = 0.4 \times 10 = 4\text{м};$$

$$y = y_0;$$

$$H = 1{,}57 \cdot 10 = 15{,}7 \text{ м}.$$

За знайденими координатами визначаємо положення центру обертання; окреслюємо круглоциліндричну поверхню ковзання, розбиваємо сектор ковзання на блоки та визначаємо необхідні дані для розрахунку коефіцієнта запасу стійкості укосу.

Дані розрахунків зведено до табл. 4.

Якщо значення радіуса дуги ковзання $R = 16{,}4$ м і її довжина 24,0 м, за формулою (8) визначаємо коефіцієнт стійкості:

$$k_{st} = \frac{\sum P_{\text{В}}\, tg\varphi_i + \sum c_i l_i}{\sum P_{\text{В}} x_i} R = \frac{928.0 \cdot 0{,}31 + 16{,}3 \cdot 24}{6710{,}0} \cdot 16{,}4 = 1{,}66.$$

Просте затоплення укосу завжди приводить до збільшення його стійкості (якщо у разі затоплення укосу не знижуються параметри зсуву ґрунтів, з яких складений схил).

Таблиця 4

№ блоку	$h_{\text{ср}}$, м	Ширина блоку, м	Об'єм блоку V_i, м^3	γ, кН/м^3	P_i, кН	Плече x_i, м	Момент $P_i x_i$, кНм
1	1,4	4,0	5,6	10,0	56,0	-1,3	-73,0
2	4,0	4,0	16,0	10,0	160,0	2,0	320,0
3	5,8	4,2	30,2	10,0	302,0	6,1	1840,0
4	5,2	2,8	14,5	10,0	145,0	9,6	1390,0
4	1,0	2,8	2,8	19,0	53,0	10,1	535,0
5	2,0	3,4	6,8	10,0	68,0	12,1	848,0
5	2,0	3,4	6,8	19,0	129,0	12,7	1640,0
6	1,0	0,8	0,8	19,0	15,0	14,7	210,0
				$\sum P_i = 928{,}0$		$\sum P_i x_i$ =6710,0	

Приклад 4. Розрахунок стійкості укосу в процесі дії на нього фільтраційного тиску в період зниження рівня води водосховища на висоту 7 м.

Співвідношення площ нижче рівня ґрунтових вод і вище його приблизно таке саме, як і у випадку просто затопленого укосу. У всякому випадку збільшення цього співвідношення настільки незначне, що знаходиться за межею точності графіку Янбу, де $\lambda_{\text{ср}}$ приведені з інтервалом у дві одиниці. Тому приймаємо, що в умовах фільтраційного потоку ґрунтових вод $\lambda_{cp} = 2{,}2$, а тому центр найбільш небезпечної круглоциліндричної поверхні ковзання збігатиметься з центром обертання у разі простого підтоплення схилу. Тоді радіус дуги ковзання

дорівнюватиме $R = 16{,}4$ м, а її довжина $L = 24$ м. Розрахункову схему показано на рис. 7.

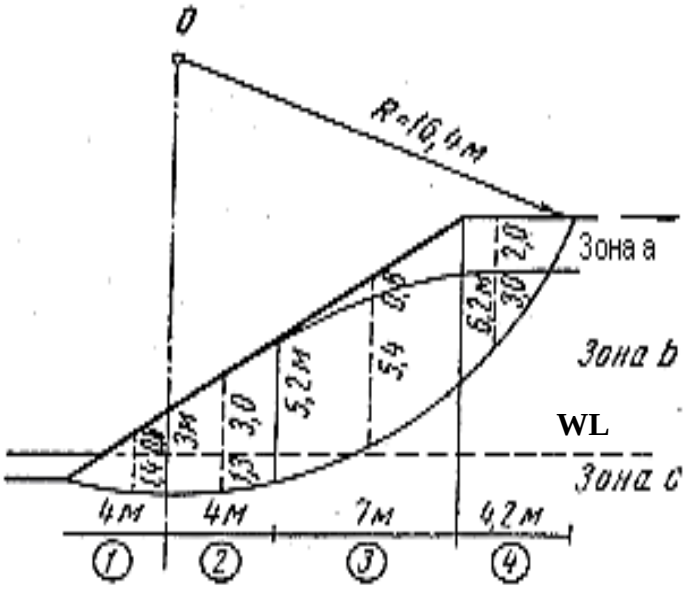

Рис. 7. Розрахункова схема до визначення стійкості схилу за методом круглоциліндричної поверхні ковзання за наявності фільтраційного тиску

Ширину блоків назначаємо з урахуванням кривої депресії, а розрахунок виконуємо за формулою (6). Для отримання фіктивного кута внутрішнього тертя $\varphi_{\text{В}}$ визначаємо коефіцієнт β за формулою (10):

$$\beta_1 = \frac{a + \frac{b}{2} + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}}{a + b + \frac{c}{2} + \frac{d}{2}} = \frac{0 + \frac{0{,}8}{2} + \frac{1{,}4}{2}}{0 + 0{,}8 + \frac{1{,}4}{2}} = 0{,}73,$$

і так для кожного наступного блоку. Всі дані розрахунків зведені до табл. 5.

Таблиця 5

№ блоку	V_i, м^3	γ, кН/м^3	$P_i = V_i\,\gamma_W$, кН	Плече x_i, м	$P_i x_i$, кНм	β_i	$tg\varphi_{\text{В}}$	$P_i\,tg\varphi_{\text{В}}$, кНм
1	6,9	19,0	131,1	-1,3	-170,4	0,73	0,23	30,2
2	16,4	19,0	311,6	2,0	623,2	0,60	0,19	59,2
3	39,9	19,0	758,1	7,5	5685,8	0,57	0,18	136,4
4	13,1	19,0	248,9	12,4	3086,4	0,70	0,22	54,2
				$P_i x_i = 9224{,}9$		$\sum P_i\,tg\varphi_{\text{В}} = 280{,}0$		

Відповідно до формули (6) коефіцієнт стійкості схилу за умови впливу на нього фільтраційного потоку набуває вигляду:

$$k_{st} = \frac{\sum P_i\, tg\varphi_{\text{В}} + \sum c_i l_i}{\sum P_i x_i} R = \frac{280{,}0 + 16{,}3 \cdot 24}{9224{,}9} \cdot 16{,}4 = 1{,}19.$$

Якщо врахувати, що погрішність за формулою (6) становить біля 10 % у бік збільшення коефіцієнта запасу, то розрахунок показує, що схил у разі дії на нього фільтраційного потоку буде знаходитись в стані, близькому до стану граничної рівноваги.

4. Розрахунок стійкого укосу за методом рівноміцного схилу [7]

Метод побудови рівноміцного схилу запропонований проф. Н. Н. Масловим і заснований на положенні, що ступінь стійкості укосу визначається рівнянням:

$$k_{st} = \frac{tg\psi_p}{tg\alpha}, \qquad (10)$$

де α – кут нахилу до обрію укоса в точці, що розглядається (рис. 8); ψ_p – кут зсуву в тій самій точці грунтового масиву.

Аналітичне рішення цього методу зводиться до визначення координат точок:

$$x = \frac{1}{\gamma\, tg^2\varphi}\{\gamma\, z\, tg\varphi + c \ln(p_0\, tg\varphi + c) - c \ln[(p_0 + \gamma\, z)\, tg\varphi + c]\}, \qquad (11)$$

де z, x – координати точки, що розглядається (рис. 8); γ – питоме вага ґрунту; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту; c – питоме зчеплення ґрунту; p_0 – рівномірно розподілене навантаження на поверхні землі за брівкою схилу.

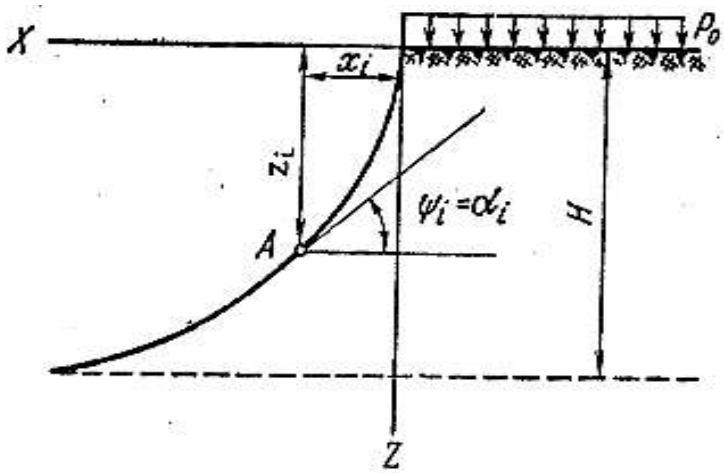

Рис. 8. Схема до розрахунку рівноміцного схилу за методом Н. Н. Маслова

Якщо сили тертя в ґрунті дорівнюють нулю (c = 0), то розрахунок координат рівноміцного схилу виконується за формулою:

$$x = \frac{\gamma}{2c} z^2 + \frac{p_0}{c} z \,. \qquad (12)$$

Приклад 5. Схил висотою 30 м прорізається виїмкою. Схил складений такими ґрунтами (рис. 9):

- шар 1 – суглинок, потужністю 10 м, що має питому вагу $\gamma = 20{,}0$ кН/м^3, кут внутрішнього тертя $\varphi = 20°$ і питоме зчеплення $c = 20{,}0$ кПа .

- шар 2 – суглинок з прошарами піску і супіску потужністю 5м, що має наступні характеристики: $\gamma = 21{,}0$кН/м^3, $\varphi = 25°$, $c = 60{,}0$ кПа.

- шар 3 – глина потужністю 15м, що має такі характеристики: $\gamma = 20{,}0$ кН/м^3, $\varphi = 15°$, $c = 15{,}0$ кПа.

За методом Н.Н. Малова побудувати:

а) обрис стійкого схилу, якщо коефіцієнт стійкості $k_{st} = 1$;

б) обрис схилівів, якщо коефіцієнт стійкості $k_{st} = 1{,}25$;

Схил проєктуємо графо-аналітичним методом з використанням формули (10).

Розбиваємо укос по вертикалі на умовні шари потужністю по 5 м кожний і для основи виділеного таким чином шару визначимо природнє навантаження і кут зсуву ψ.

Виконуємо розрахунок вказаних величин для першої точки укосу, що розташована на глибині z_1 = 5 м від поверхні землі.

1. Визначаємо природний тиск ґрунту $p_{\text{пр}}$:

$$p_{\text{пр}} = z_1\,\gamma = 5 \cdot 19{,}0 = 95{,}0 \text{ кПа.}$$

2. Визначаємо тангенс кута схилу ψ_1 і величину безпосередньо самого кута зсуву ψ_1:

$$tg\psi_1 = tg\varphi + \frac{c}{p_{\text{пр}}} = tg\,20^0 + \frac{20{,}0}{95{,}0} = 0{,}57,$$

$$\psi_1 = 30^0 \text{ (з округленням до градусів).}$$

3. Якщо $k_{st} = 1$ кут, закладання схилу α_1 становить $\alpha_1 = \psi_1 = 30^0$; якщо $k_{\text{st}} = 1{,}25$:

$$\alpha_1 = \frac{\psi_1}{1{,}25} = \frac{30}{1{,}25} = 24°,$$

і так розраховується кожна наступна точка.

Данні розрахунків зведені в табл. 6.

Таблиця 6

№ точки	z, *м*	$p_{пр}$, кПа	φ, град	$tg\varphi$	c, кПа	$c/p_{пр}$	$tg\psi$	ψ	α , якщо $k_{st} = 1$	α , якщо $k_{st} = 1{,}25$
1	5	95,0	20	0,36	20,0	0,21	0,57	30	30	24
2	10	190,0	20	0,36	20,0	0,11	0,47	25	25	20
3	15	295,0	25	0,46	60,0	0,20	0,66	33	33	26
4	20	395,0	15	0,27	15,0	0,04	0,31	17	17	14
5	25	495,0	15	0,27	15,0	0,03	0,30	17	17	14
6	30	595,0	15	0,27	15,0	0,02	0,29	16	16	13

Побудова обрису схилу починається з нижньої точки 6. Відкладаємо з точки 6 пряму під кутом $\alpha_6 = 16^0$ (або 13°) та продовжуємо його до перетину з прямою на глибині z = 25м. Потім відкладаємо наступний кут α_5 і т. д.

Побудовані таким чином схили показані на рис. 9.

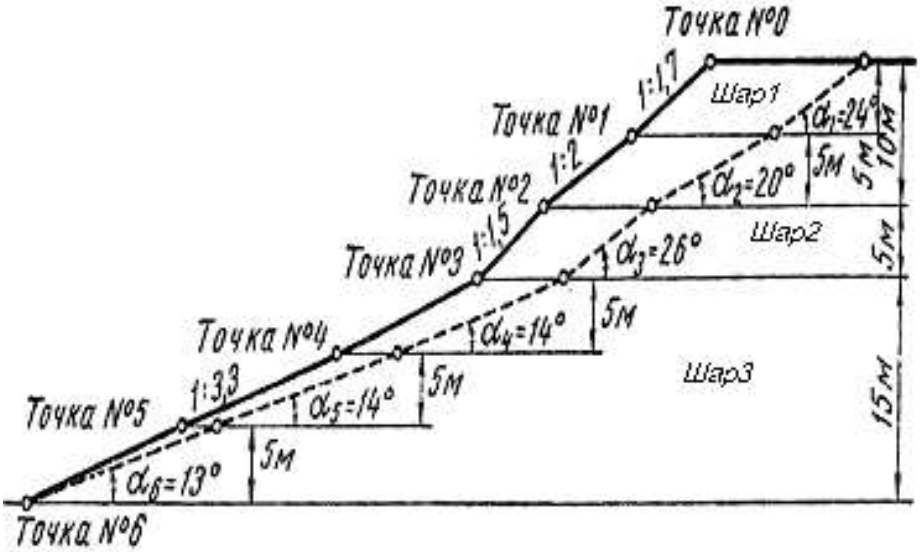

Рис. 9. Обрис укосу, побудованого за методом рівноміцного схилу: суцільна лінія, якщо $k_{st} = 1$, пунктирна – якщо $k_{st} = 1{,}25$

Приклад 6. Схил висотою 15 м складений однорідним глинистим ґрунтом, що має такні характеристики: питома вага $\gamma = 20{,}0$кН/м^3, кут внутрішнього тертя $\varphi = 15°$, загальне зчеплення с $= 40{,}0$кПа.

Необхідно побудувати обрис стійкого укосу за методом Н.Н. Маслова аналітичним способом без урахування і з урахуванням рівномірно розподіленого навантаження за на поверхні укосу, величиною $P_0 = 300{,}0$ кПа.

1. Побудова обрису стійкого схилу за відсутності навантаження P_0 за брівкою укосу виконуємо за формулою (11). Якщо $P_0 = 0$, ця формула матиме такий вигляд:

$$x = \frac{1}{\lambda\, tg^2\varphi}\left[\gamma\, z\, tg\varphi + c\, lnc - c \cdot ln\,(\gamma\, z\, tg\varphi + c)\right]. \qquad (13)$$

Для розрахунку координати x стійкого укосу розбиваємо його по висоті на умовні шари потужністю 2 м, і для основи кожного виділеного таким чином шару ґрунту визначимо координату x.

Наприклад, для підошви першого шару, якщо $z = 2$ (рис. 10), матимемо:

$$x_1 = \frac{1}{2\, tg15^0}\left[2 \cdot 2\, tg15^0 + 4 \cdot 4 - 4(2 \cdot 2\, tg15^0 + 4)\right] = 0{,}7 \text{ м}.$$

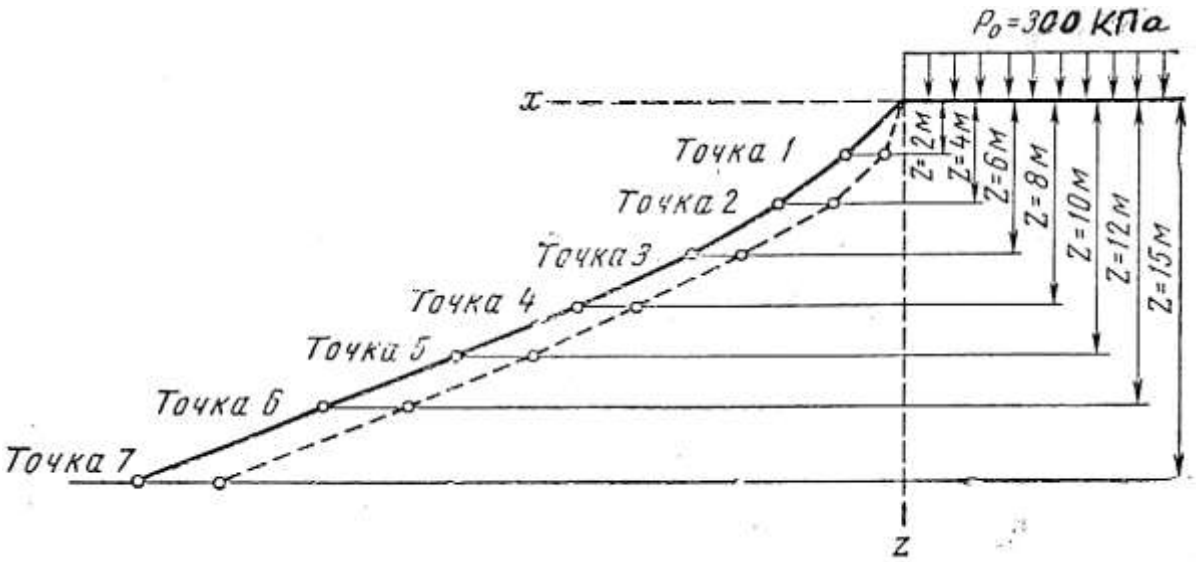

Рис. 10. Обрис схилу:
суцільна лінія – з урахуванням рівномірно розподіленого навантаження $P_0 = 300$ кПа; пунктирна – без урахування навантаження

Виконаємо таким чином розрахунок величини x для кожної точки, отримані значення зводимо до табл. 7.

Таблиця 7

№ шару	z, м	$tg\ \varphi$	$\frac{1}{\gamma\, tg^2\varphi}$	$\gamma\, z\, tg\varphi$	$c\ \ln c$	$c\ \ln(\gamma\, z\, tg\varphi + c)$	x, м
1	2	0,27	7,15	1,08	5,52	6,5	0,7
2	4	0,27	7,15	2,16	5,52	7,3	2,7
3	6	0,27	7,15	3,24	5,52	7,9	6,1
4	8	0,27	7,15	4,32	5,52	8,5	9,6
5	10	0,27	7,15	5,40	5,52	8,9	14,5
6	12	0,27	7,15	6,48	5,52	9,3	19,3
7	15	0,27	7,15	8,10	5,52	9,9	26,8

2. Побудову обрису стійкого схилу за наявності рівномірно розподіленого навантаження $P_0 = 300$ кПа за брівкою укосу (див. рис. 10) виконуємо з використанням формули (12). Оскільки порядок розрахунку координати x вказано в п. 1 розв'язку задачі, обмежимося зведенням розрахункових даних до табл. 8.

Таблиця 8

№ шару	z, м	$tg\varphi$	$\frac{1}{\gamma\, tg^2\varphi}$	$\gamma\, z\, tg\varphi$	$c\ \ln(p_0 \cdot tg\varphi + c)$	$c\ \ln[(p_0 + \gamma \times z)\, tg\varphi + c]$	x, м
1	2	0,27	7,15	10,8	6,28	7,04	2,3
2	4	0,27	7,15	21,6	6,28	7,76	4,9
3	6	0,27	7,15	32,4	6,28	8,36	8,3
4	8	0,27	7,15	43,2	6,28	8,84	12,9
5	10	0,27	7,15	54,0	6,28	9,24	17,3
6	12	0,27	7,15	64,8	6,28	9,64	22,8
7	15	0,27	7,15	81,0	6,28	10,20	30,0

Побудовані за даними таблиці 7 і 8 схили показано на рис.10.

5. Визначення коефіцієнта стійкості основи підпірних стін за круглоциліндричними поверхнями ковзання [7]

Суть цього методу полягає у визначенні мінімального коефіцієнта запасу стійкості основи k_{st}. Коефіцієнт стійкості за такої умови визначається як відношення суми моментів сил опору до суми моментів сил, що зсувають.

Для розрахунку моментів сегмент ковзання *ABCD* (рис. 11) розбивають на декілька вертикальних призм, ширина призм *L* береться довільно. Сегмент ковзання має обов'язково проходити через кутову точку фундаменту *B*. Моменти опору і зсуву визначаються відносно центра *O* дуги ковзання.

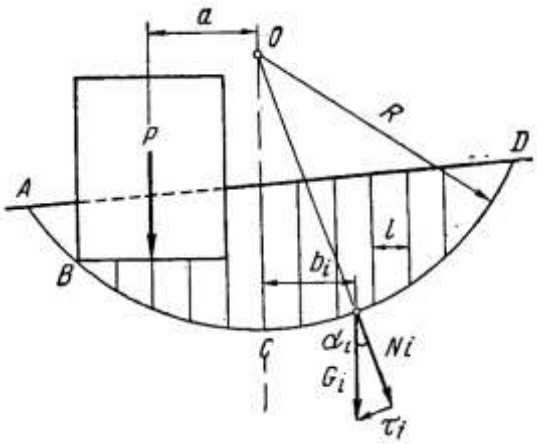

Рис. 11. Розрахункова схема для визначення стійкості споруди методом круглоциліндричної поверхні ковзання

Формула для визначення коефіцієнау запасу стійкості має такий вигляд:

$$k_{st} = \frac{\sum G_i \cos \alpha_i \, tg\varphi_i + \sum c_i \, l_i}{\sum G_i \sin\alpha_i}, \tag{14}$$

де G_i – вага розрахункового блоку; α_i – кут між напрямком сил G_i та N_i; φ_i – кут внутрішнього тертя на даній ділянці поверхні ковзання; c_i – загальне зчеплення, що діє на даній ділянці дуги ковзання; l_i – ширина розрахункового блоку.

Моменти вважаються позитивними по низхідному відрізку дуги ковзання *AC* і негативними – по висхідному відрізку дуги ковзання *CD* (для дотичних напружень).

Якщо моменти дотичних напружень замінити моментами ваги споруди та блоків щодо центрf обертання *O*, тоді формула (14) матиме вигляд:

$$k_{st} = \frac{\sum G_i \cos \alpha_i \, tg\varphi_i + \sum c_i \, l_i}{Pa + \sum G_i \, b_i} R, \tag{15}$$

де P – вага споруди; a – плече моменту сили P відносно центра обертання *O*; b_i – плече моменту ваги розрахункового блоку відносно центра обертання *O*.

Якщо поверхня землі *AD* (рис. у процесі при її закладення землі, то формула (15) набуває вигляду:

$$k_{\text{зап}} = \frac{\sum G_i \cos \alpha_i \, tg\varphi_i + \sum c_i \, L_{\text{i}}}{Pa} R. \tag{16}$$

Значення $cos\ \alpha_i$ в більшості випадків наближається до одиниці. Тоді формула (14) може мати такий вигляд:

$$k_{\text{зап}} = \frac{\sum G_i tg\varphi_i + \sum c_i \, L_{\text{i}}}{Pa + \sum G_i \, b_i} R, \tag{17}$$

а формула (16) при однорідної товщі грунтів основи становить:

$$k_{\text{зап}} = \frac{Gtg\varphi + \text{c}L}{Pa} R, \tag{18}$$

де G – загальна вага сектору ковзання (при горизонтальній поверхні землі); L – довжина дуги ковзання.

Похибка в розрахунках за формулами (17), (18) становить близько 10 % (у бік завищення коефіцієнта запасу).

Для випадку однорідної товщі, складеної пластичними глинистими ґрунтами ($\varphi = 0$) і горизонтальній поверхні землі, залежність (16) ще більш спрощується:

$$k_{\text{зап}} = \frac{(l_1 \sum c_w + l_2 \sum c_w + \ldots + l_n \sum c_w)}{Pa} R = \frac{L \sum c_w}{Pa} R,$$

де $\sum c_w$ – зчеплення зв'язаності ґрунту.

Приклад 7. Розрахувати стійкість підпірної стіни за методом круглоціліндричних поверхонь ковзання [7].

Вихідні дані: ширина стіни $b = 4$ м, висота стінки від підошви фундаменту $H = 8$ м, ширина стінки в рівні обрізу фундаменту 3,4 м, ширина по верху - 1,4 м, заглиблення фундаменту $h_{\text{загл}} = 2$ м, питома вага кладки $\gamma = 20$ кН/м^3.

Характеристики ґрунту засипки і основи: об'ємна вага $\gamma_w = 20$ кН/м^3, кут внутрішнього тертя $\varphi_w = 12°$, зчеплення $c_w = 10$ кН/м^2.

Розв’язання задачі полягає в тому, щоб відшукати найменший коефіцієнт запасу стійкості. Необхідно визначити декілька поверхонь ковзання і таким чином встановити поверхні ковзання з найменшим коефіцієнтом запасу стійкості.

Зазвичай прораховують спочатку дуги ковзання, центри яких розташовані по вертикалі. За ним встановлюють найменший коефіцієнт запасу. Потім в рівні центру обертання, для якого отримано найменший коефіцієнт запасу, розраховують коефіцієнти запасу по горизонталі.

Порядок можна змінювати: спочатку розрахувати коефіцієнти запасу по дугах, центри обертання яких розташовані по горизонталі, а потім по вертикалі.

Хід розрахунку наступний. Розраховуємо коефіцієнт запасу за різними круглоциліндричними поверхнями обертання, центри яких розташовані по вертикалі:

1. З довільно обраного центра обертання O_1 проводимо дугу таким чином, щоб вона проходила через кут *E* підпірної стінки. Цю лінію приймаємо за можливу поверхню ковзання (рис. 12).

2. Графічно, в масштабі, визначаємо радіус дуги обертання. Він дорівнюватиме $R_1 = 13{,}8$ м.

3. Із трикутників *ABO* і *CDO* визначаємо значення центральних кутів α_1 і α_2, попередньо визначивши значення катетів O_1B та O_1C (розміри визначаємо з креслення): O_1B= 4 м; O_1C = 10 м.

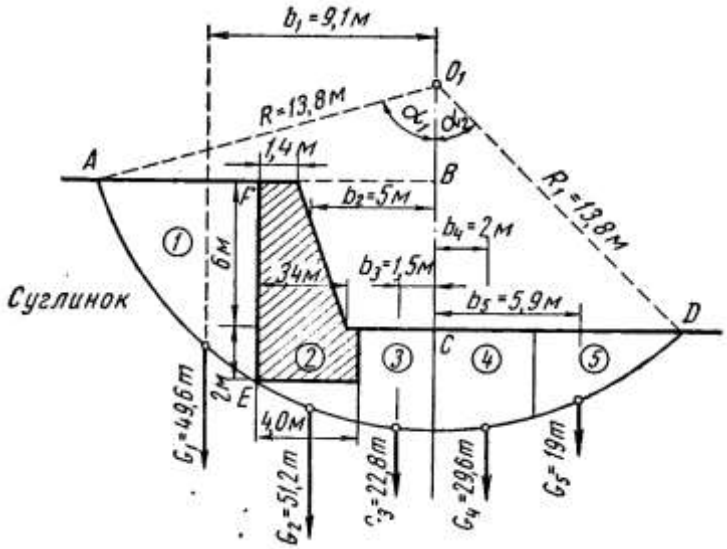

Рис. 12. Розрахункова схема визначення стійкості основи підпірної стіни за круглоциліндричними поверхнями ковзання, з центром обертання O_1

Із трикутника ABO_1:

$$\cos\alpha_1 = \frac{O_1B}{R_1} = \frac{4}{13{,}8} = 0{,}29;\ \alpha_1 = 78°8'.$$

Із трикутника CDO_1:

$$\cos\alpha_2 = \frac{O_1C}{R_1} = \frac{10}{13{,}8} = 0{,}725;\ \alpha_2 = 43°28'.$$

4. Визначаємо довжину дуги ковзання L_1 на відрізку *AED*:

$$L_1 = (\alpha_1 + \alpha_2)R_1 = \frac{\pi 116°36'}{180°}13{,}8\ \text{м} = 28{,}1\ \text{м}.$$

Суму кутів α_1 та α_2 приводимо в радіанах.

5. Визначаємо момент сил зчеплення по поверхні ковзання *AED*:

$$L_1 c_w R_1 = 28{,}1 \cdot 10 \cdot 13{,}8 = 3870\ \text{кНм}.$$

6. Сектор ковзання розбивають на блоки (див. рис. 12) і для кожного блоку розраховуємо його площу, вагу, місце розташування центра ваги, момент щодо центра обертання і момент утримувальних сил.

Сектор ковзання розбитий на 5 блоків. Ширина блоків визначається: зручністю розрахунків, положенням шарів (якщо шарувата товща) і кривизною дуги ковзання, оскільки, визначаючи площу блоків, вона випрямляється.

7. В якості прикладу визначимо вихідні дані для блоку 1.

Площа блоку визначається з умови випрямлення ділянки дуги ковзання *AE*. Тоді отримаємо трикутник *AEF*, площа якого дорівнюватиме:

$$S_1 = AF \cdot \frac{FE}{2} = 6{,}2 \cdot \frac{2{,}8}{2} = 24{,}8\ \text{м}^2$$

(довжини сторін трикутника *AF* і *FE* визначаються з креслення).

Вага блоку:

$$G_1 = s_1\gamma_w = 24{,}8 \cdot 20 = 496\ \text{кН}.$$

Відстань центра ваги блоку щодо центра обертання O_1:

$$b_1 = BF + \frac{AF}{3} = 7 + \frac{6{,}2}{3} = 9{,}1\ \text{м}.$$

Момент ваги блоку щодо центра обертання O_1:

$$G_1 b_1 = 496 \cdot 9{,}1 = 4520\ \text{кНм}.$$

Момент утримують сил тертя по дузі ковзання *AE*:

$$G_1 tg\varphi_w R_1 = 496 \cdot 0{,}213 \cdot 13{,}8 = 1450\ \text{кНм},$$

і так проводиться розрахунок для кожного наступного блоку.

8. Оскільки підпірна стінка не сприймає додаткового вертикального навантаження, крім власної ваги, а щільність матеріалу стіни дорівнює

об'ємній вазі ґрунту (20 кН/м^3), то її вага включається в вагу блоку 2. При цьому для спрощення розрахунків ураховується, що вага стіни рівномірно розподілена по підошві, а центри тяжіння всіх розрахункових блоків 2, 3, 4 і 5 прикладені в середині блоків.

Дані розрахунків по першій кривій ковзання з центром обертання O_1 зведені до табл. 9.

Таблиця 9

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту відносно O_1, b_i, м	$G_i b_i$, кНм	$G_1 tg\varphi_w R_1$, кНм
1	24,8	496	9,1	4520	1450
2	25,6	512	5,0	2560	1500
3	11.4	228	1,5	340	670
4	14,8	296	2,0	-590	870
5	9,5	190	5,9	-1120	560
			Всього	5710	4050

Визначається коефіцієнт запасу

$$k_{st} = \frac{\sum G_i\, tg\varphi\, R_1 + L_1\, c_w\, R_1}{\sum G_i\, b_i} = \frac{4050 + 3870}{5710} = 1{,}38.$$

Власна вага підпірної стіни *P* включена в вагу блоку 2.

9. Визначаємо найменше значення коефіцієнта запасу стійкості спочатку у вертикальному напрямку. Для цього перенесемо центр обертання *O* другої кривої ковзання вгору по вертикалі на 2 м; отримаємо положення центра обертання O_2 другої кривої ковзання (рис. 13).

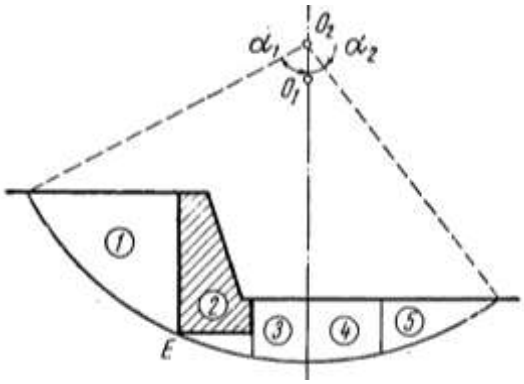

Рис. 13. Розрахункова схема для визначення стійкості основи підпірної стін по круглоциліндричній поверхні ковзання з центром обертання O_2

Як і в першому випадку, радіусом O_2E окреслюємо положення дуги ковзання, визначаємо графічно довжину радіусу дуги ковзання і всі дані, необхідні для розрахунку коефіцієнта запасу. Порядок розрахунку аналогічний вищевказаному, а дані розрахунку зведені в табл. 10.

Таблиця 10

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту відносно O_2, b_i, м	$G_i b_i$, кНм	$G_1 tg\varphi\ R_2$, кНм
1	29,6	592	9,5	5620	1970
2	25,0	500	5,0	2500	1660
3	10,4	208	1.5	310	690
4	13,4	268	2,0	-540	860
5	9,0	180	5,9	-1060	600
			Всього	6830	5780

Величина радіусу $R_2 = 15{,}7$ м, довжина дуги ковзання $L_2 = 29{,}6$ м.

Коефіцієнт запасу по другій дузі ковзання дорівнює:

$$k_{st\,2} = \frac{5780 + 29{,}6 \cdot 10 \cdot 15{,}7}{6830} = 1{,}53.$$

10. Змістимо центр обертання ще на 2 м вгору по вертикалі (рис. 14) і отримаємо положення центру обертання O_3.

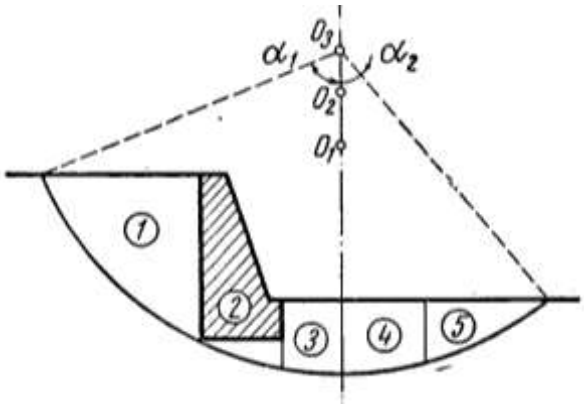

Рис. 14. Розрахункова схема для визначення стійкості основи підпірної стіни по круглоциліндричній поверхні ковзання з центром обертання O_3

Дані розрахунків за третьою кривою ковзання зведені в табл. 11.

Величина радіусу $R_3 = 17{,}6$ м, довжина дуги ковзання $L_3 = 31{,}6$ м.

Коефіцієнт запасу по третій дузі ковзання дорівнює:

$$k_{st\,3} = \frac{7260 + 31{,}6 \cdot 10 \cdot 17{,}6}{7650} = 1{,}66.$$

Таблиця 11

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту b_i, м	$G_i b_i$, кНм	$G_1 tg\varphi\ R_3$, кНм
1	34,4	688	9,9	6820	2560
2	25,6	512	5,0	2560	1910
3	11,4	228	1,5	340	850
4	14,8	296	2,0	-590	1100
5	11,2	224	6,6	-1480	840
			Всього	7650	7260

11. Значення коефіцієнта запасу вверх по вертикалі збільшується. Тому необхідно досліджувати значення коефіцієнтів запасу вниз по вертикалі від центру обертання O_1.

Відкладемо від O_1 вниз по вертикалі на 2 м і отримаємо положення центра обертання O_4 четвертої дуги ковзання (рис. 15). Як і для першої дуги ковзання, розраховуємо усі необхідні величини, що входять до виразу для визначення коефіцієнта запасу стійкості (табл. 12).

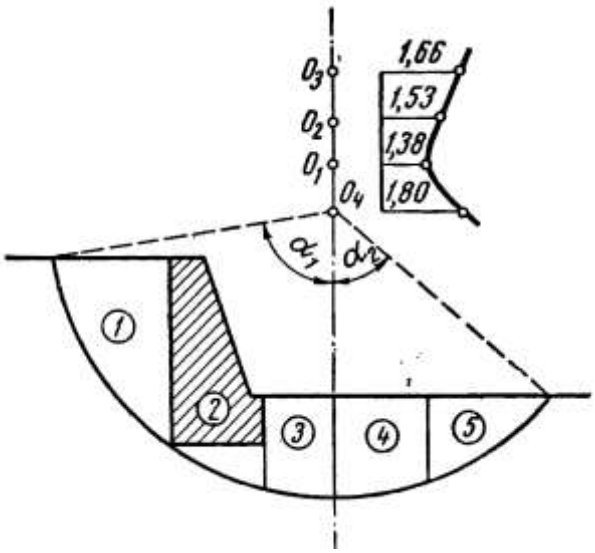

Рис. 15. Розрахункова схема для визначення стійкості основи підпірної стіни по круглоциліндричній поверхні ковзання з центром обертання O_4.

Величина радіусу $R_4 = 12{,}4$ м, довжина дуги ковзання $L_4 = 26{,}1$ м. Коефіцієнт запасу по четвертій дузі ковзання дорівнює:

$$k_{st\,4} = \frac{4530 + 26{,}1 \cdot 10 \cdot 12{,}4}{4860} = 1{,}80.$$

Отже, для першої круглоциліндричної поверхні ковзання має місце найменший коефіцієнт запасу, який дорівнює $k_{st} = 1{,}38$ (рис. 15).

Таблиця 12

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту b_i, м	$G_i\, b_i$, кНм	$G_i tg\varphi\ R_4$, кНм
1	20,8	416	8,7	3620	1090
2	26,4	528	5,0	2640	1380
3	13,2	264	1,5	400	670
4	16,8	336	2,0	-670	880
5	9,7	194	5,8	-1130	510
			Всього	4860	4530

12. Після того як знайдена область найменших значень коефіцієнта запасу стійкості у вертикальному напрямку, визначаємо положення найменшого значення коефіцієнта запасу в горизонтальном напрямку. Для цього досліджуються дуги ковзання, центри обертання яких розташовані на горизонталі, що проходять через точку O_1 з найменшим значенням коефіцієнта запасу по вертикалі.

Відкладемо точку O_5 ліворуч від точки O_1 (рис. 16) і визначимо коефіцієнт запасу по п'ятій дузі ковзання.

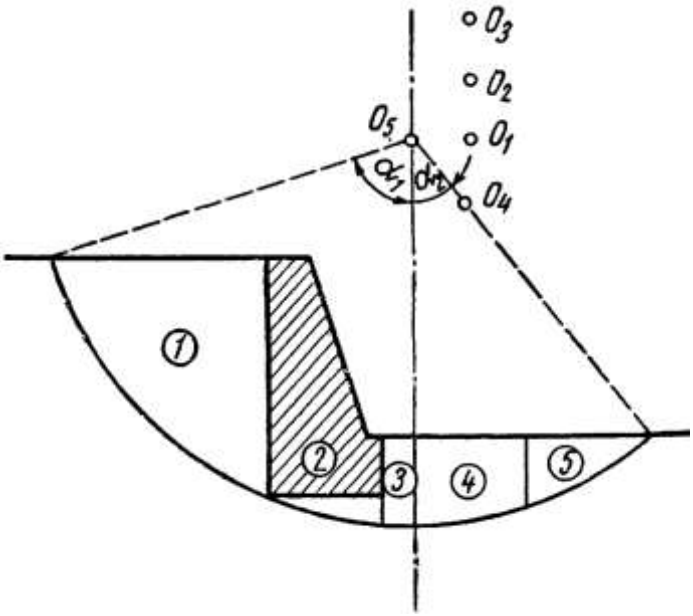

Рис. 16. Розрахункова схема для визначення стійкості основи підпірної стіни по круглоциліндричній поверхні ковзання з центром обертання O_5

Розрахунок проводимо аналогічно першій кривій ковзання. Дані розрахунків зведені до табл. 13.

Таблиця 13

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту b_i, м	$G_i\, b_i$, кНм	$G_i tg\varphi\, R_5$, кНм
1	29,6	592	7,5	4440	1650
2	23,4	468	3,0	1400	1310
3	3,0	60	0,5	30	170
4	10,8	216	2,0	-430	600
5	5,3	106	5,5	-580	300
			Всього	4860	4030

Величина радіусу $R_5 = 13{,}1$ м, довжина дуги ковзання $L_5 = 23{,}8$ м.

Коефіцієнт запасу по п'ятій дузі ковзання дорівнює:

$$k_{st\,5} = \frac{4030 + 23{,}8 \cdot 10 \cdot 13{,}1}{4860} = 1{,}47.$$

13. Оскільки отриманий по п'ятій дузі ковзання коефіцієнт запасу виявився більшим, ніж по першій дузі ковзання, то усі дуги ковзання, центри яких розміщені лівіше центру обертання O_5, матимуть k_{st} більше, ніж по першій дузі ковзання. Тому досліджуємо область правіше центра обертання. Відкладемо точку O_6 правіше на 2 м від центра обертання (рис. 17) і виконуємо ті самі розрахунки, що і для п'ятої дуги ковзання (табл. 14).

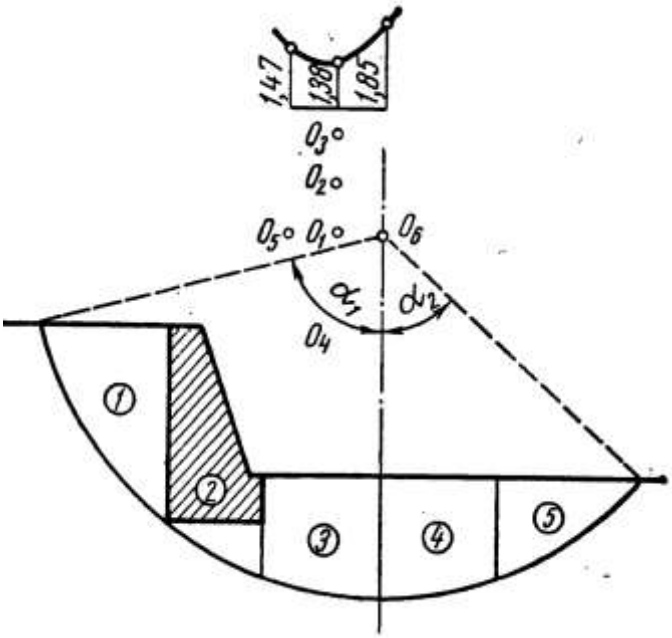

Рис. 17. Розрахункова схема для визначення стійкості основи підпірної стіни по круглоциліндричній поверхні ковзання з центром обертання O_6

Таблиця 14

№ блоку	Площа блоку S_i, м^2	Вага блоку G_i, кН	Плече моменту b_i, м	G_i b_i, кНм	$G_i tg\varphi\ R_6$, кНм
1	21,4	432	10,8	4670	1380
2	26,4	528	7,0	3700	1680
3	23,0	460	2,5	1150	1470
4	23,0	460	2,5	-1150	1470
5	13,0	260	8,1	-2110	830
			Всього	6260	6830

Величина радіусу $R_6 = 15{,}0$ м, довжина дуги ковзання $L_6 = 31{,}8$ м.

Коефіцієнт запасу по шостій дузі ковзання дорівнює:

$$k_{st\ 6} = \frac{6830 + 31{,}8 \cdot 10 \cdot 15}{6280} = 1{,}85.$$

Отже, і в горизонтальному напрямку найменший коефіцієнт запасу стійкості основи підпірної стінки визначається за першою круглоциліндричною поверхнею ковзання і дорівнює k_{st} = 1,38 (див. рис. 17).

Список літератури

Основний

1. Цимбал С. Й. Фундаменти спеціальних споруд і підземне будівництво: навч. посі. / С. Й. Цимбал, О. В. Малишев. – Київ : КНУБА, 2017. – 204 с.

2. Настанова з проектування котлованів для улаштування фундаментів і заглиблених споруд: ДСТУ-Н Б В.2.1-32:2014 / Мінрегіонбуд України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2015. – 100 с.

3. Настанова з проектування підпірних стін: ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 / Мінрегіонбуд України. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2015. – 84 с.

4. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів і обвалів. Основні положення: ДБН В.1.1.-46-2017. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 43 с.

5. Zarys Geotechniki / Z. Wiłun. – Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2022 –- 723 p.

6. Theory of Slope Stability / K.M. Cruikshank and A.M. Johnson – Portland: Portland State University, 2002. – 87 p.

Додатковий

1. Котов М.Ф. Механика грунтов в примерах. – М. : Высш. шк., 1968. – 270 с.

Для нотаток

Навчально-методичне видання

РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ СХИЛІВ І ПІДПІРНИХ СТІН

Методичні вказівки
для виконання розрахункової роботи з дисципліни
«Спецкурс випускової кафедри»
для студентів спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Укладач **Малишев** Олег Вікторович

Комп'ютерне верстання *А.П. Селівестрової*

Підписано до друку 25.03. 2024. Формат 60 × 84 1/ 16.
Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,25.
Електронний документ. Вид. № 122/ІІІ-23

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002