

## УРАХУВАННЯ МЕХАНІЗМУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ІЗ ДИСКРЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Удосконалено метод розрахунку дорожніх одягів із дискретних та малозв'язних матеріалів для оцінки міцності конструкцій на зсувостійкість по підшві підстилаючого шару. Для опису напружено-деформованого стану системи використовуються рівняння, що враховують розподільчу здатність незв'язного матеріалу. Представлена методика визначення параметру розподільчої здатності та його практичне впровадження при розрахунку конструкцій.

Ключові слова: механізм контактної взаємодії, напруження, дискретні матеріали, розподільча здатність, оцінка міцності.

В практиці проектування нежорстких дорожніх одягів широке використання знаходять шари із зернистих (дискретних) матеріалів та шари із малозв'язних матеріалів, що за своїми властивостями близькі до дискретних. Незв'язний матеріал не працює на згин і розтяг, основним критерієм міцності в цьому випадку є міцність на зсув. Помилка у визначенні складових головних напруг може привести до суттєвих неточностей при розрахунку дорожніх одягів на міцність, так як існуючі теоретичні основи розрахунку дорожніх одягів не враховують специфіку передачі зусиль в шарах із дискретних матеріалів. У зв'язку з цим необхідно враховувати вплив структури матеріалу для відображення реальної картини напруженого та деформованого станів (НДС) конструкцій з шарами із дискретних матеріалів [1,2].

В роботах авторів [3,4] доведена можливість сумісного використання математичного апарату теорії пружності та механізму контактної взаємодії для дослідження напружено-деформованого стану шарів конструкції дорожнього одягу із дискретних матеріалів. Врахування сил тертя, зчеплення, бокового розпору і розміру зерен дозволяє встановити фізичну суть процесу деформування шарів конструкції та природу походження параметра розподільчої здатності дискретного середовища [3].

Проведені дослідження дозволяють підійти до аналізу напружено-деформованого стану дорожніх одягів із шарами з дискретних матеріалів та їх розрахунку. При врахуванні всіх вищенаведених параметрів матеріалу шару з'явилась принципова можливість дослідити НДС дорожніх одягів із шарами з дискретних матеріалів, використовуючи отримане сумісне рішення теорії пружності та механіки контактної взаємодії. В таких системах спостерігається вища концентрація напружень, ніж це впливає з рішень теорії пружності. Факт цей не новий, проте, до цих пір не вдавалося

аргументовано врахувати його при розрахунку дорожнього одягу.

Другим, досить істотним фактом, є те, що при штампових випробуваннях дорожнього одягу, отримані значення вертикальної деформації поверхні дискретного шару значно відрізняються від розрахункових по теорії пружності. Тут позначається специфіка поведінки дискретної середовища під навантаженням, відмінна від умов для суцільної пружної середовища. У відповідності з фактичним напружено-деформованим станом такий параметр, як загальний модуль пружності дорожнього одягу буде більше при розрахунку, ніж по теорії пружності, так як відбувається більш концентроване розподіл навантаження всередині дискретного шару.

Встановлені закономірності поведінки шаруватих систем з дискретних матеріалів під навантаженням і отриманий математичний апарат для дослідження НДС таких систем дозволяє запропонувати вдосконалені практичні рекомендації розрахунку на міцність і оцінку міцності при польових випробуваннях дорожнього одягу перехідного типу з шарами з дискретних матеріалів. При розрахунку дорожнього одягу перехідного типу слід враховувати, що для незв'язних матеріалів граничним станом є місцевий граничний стан, або теорія найбільших дотичних напружень.

Розрахунок на міцність дорожніх одягів із дискретних матеріалів складається з наступних етапів:

1. Для існуючих конструкцій дорожніх одягів вихідні дані встановлюють за результатами розкриття конструкції та візуальної оцінки її стану або за результатами оцінки міцності дорожніх одягів по пружному прогину [5]. При оцінці міцності по пружному прогину необхідно мати дані про товщини шарів із незв'язних матеріалів.

Вихідними даними є:

- конструкція дорожнього одягу з вказуванням товщини та модуля пружності шарів;
- розрахункове навантаження;
- модуль пружності ґрунтової основи, кут внутрішнього тертя та коефіцієнт зчеплення;
- гранулометричний склад дискретних шарів.

2. Для встановлення значення коефіцієнту «с» необхідно, перш за все, визначити відносну товщину шару з незв'язного (дискретного) матеріалу як розрахункове число рядів скелетоутворюючої фракції шару.

Чисельне значення коефіцієнту «с» або його прогнозуєма величина визначається відповідно графіку (рисунок 1) або по встановленій формулі 2.

Для визначення коефіцієнту розподільчої здатності «с» запропонована наступна методика:

- коефіцієнт розподільчої здатності шарів з дискретного матеріалу, як і

показник інтенсивності падіння (концентрації) напружень по товщині шару залежить від товщині шару та діаметру скелетоутворюючої фракції.

- відносна товщина шару  $n$  визначається, як відношення товщини шару до діаметру скелетоутворюючої фракції:

$$n=h/\delta, \quad (1)$$

де  $h$  – товщина шару, мм;

$\delta$  – середній розмір скелетоутворюючої фракції, мм.

Середній розмір скелетоутворюючої фракції шару визначається як середньозважена величина за результатами аналізу гранулометричного складу матеріалу шару.

Для контролю необхідно порівняти значення  $E_{\text{екв}}$  дискретне розрахункове з експериментальним значенням  $E_{\text{екв}}$ . Так як загальний (еквівалентний) модуль пружності конструкції визначається за величиною пружного прогину і пошаровим перерахунком, то допустима похибка може бути збільшена. При збіжності за двома показниками приймаємо отримане значення коефіцієнту «с».

За результатами визначення значення «с» для дискретних і малозв'язних шарів у різних моделях шаруватих конструкцій отримана графічна та аналітична залежність «с» від відносної товщини шару. Ця залежність буде достовірна при виконанні наступних умов:

- є чітка функціональна залежність «с» від відносної товщини шару: чим більше  $n$ , тим «с» має бути більшим.

- при віх рівних умовах для крупнозернистого дискретного або малозв'язного матеріалу значення «с» буде меншим, ніж для дрібнозернистого.

Залежність апроксимована поліномом другого ступеню у вигляді:

$$C(y)=A+B_1x+B_2x^2, \quad (2)$$

де  $A, B_1, B_2$  – постійні, які дорівнюють:

$$A = 0,50645, B_1 = 0,00682, B_2 = -0,0000188.$$

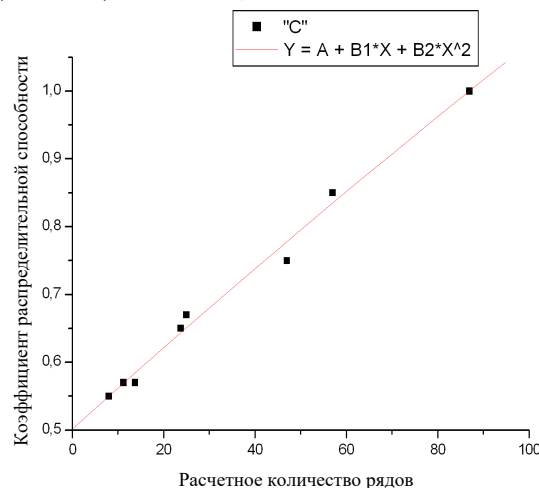


Рис. 1 Залежність параметра «с» від відносної товщини шару конструкції

3. Розрахунок напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу перехідного типу включає в себе введення вихідних даних в удосконалене теоретичне рішення [4], представлене основними залежностями:

$$\sigma_z = -q\delta \int_0^{\infty} (cz\alpha + 1)e^{-cz\alpha} J_1(\alpha\delta) d\alpha; \quad (3)$$

$$\sigma_r = -\frac{q\delta}{2} \int_0^{\infty} \left\{ \nu + (1+\nu)c^2 + [\nu - (1+\nu)c^2] \right\} e^{-cz\alpha} J_1(\alpha\delta) d\alpha; \quad (4)$$

$$u_{z \max} = q\delta \frac{1-\nu^2}{cE_1} \int_0^{\infty} R(\alpha) J_1(\alpha\delta) \frac{d\alpha}{\varepsilon}, \quad (5)$$

де  $q$  – рівномірно розподілене навантаження, МПа;  $\delta$  – постійна інтегрування;  $c$  – коефіцієнт розподільчої здатності матеріалу;  $z$  – глибина розташування конструктивного шару, см;  $\alpha$  – параметр інтегрування;  $J_1$  – функція Бесселя першого ступеню першого порядку;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

В результаті розрахунку визначаємо значення еквівалентного модуля конструкції, як дискретної системи та порівнюємо його зі значенням еквівалентного модуля конструкції в блоці «Вихідні дані». Якщо дана умова виконується, то переходимо до розрахунку на міцність підстиляючого ґрунту. Якщо умова не виконана, то необхідно перевірити правильність визначення параметра розподільчої здатності дискретного матеріалу та значення загального модуля пружності (прийнятого по ВБН [5] або визначеного при випробуваннях).

4. Перевірка розрахунку на міцність по еквівалентному модулю конструкції полягає в порівнянні прийнятого по ВБН [5] або виміряного на дорозі при обстеженні еквівалентного модуля конструкції з визначеним по удосконаленому рішенню НДС[4]. Якщо при призначенні еквівалентного модуля конструкції використовувалось значення, визначене за загальноприйнятими номограмами [5] (для нових конструкцій), то значення розрахункового модуля та визначеного буде відрізнятися на величину параметра розподільчої здатності.

5. Оцінка міцності конструкції дорожнього одягу із незв'язного матеріалу на зсувостійкість полягає у визначенні головних напруг по підшві дискретної основи – на поверхні ґрунтової основи. Максимальні напруги зсуву визначаємо по теорії Кулона-Мора за умови граничної рівноваги наступним чином:

$$\frac{1}{2} \cos \varphi (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi = \max[|\tau_n| - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi], \quad (6)$$

де  $\sigma_1, \sigma_3$  – головні напруження в точці 1 і 3 відповідно, МПа;

$\varphi$  – кут внутрішнього тертя, градуси;

$\tau_n$  – дотичне напруження на елементарній площі, МПа;

$\sigma_n$  – нормальне напруження на елементарній площі, МПа.

В результаті порівнюємо отриману уточнену величину активної напруги зсуву по підшві підстиляючого шару з активним утримуючим навантаженням, регламентованим в діючих нормативних документах [5].

6. Оцінка стану конструкції, висновки, рекомендації.

На цьому етапі дається заключення про те, чи відбувається руйнування в даній конструкції, наскільки критичним є різниця діючих напружень з допустимими.

В якості прикладу наведено розрахунок двошарової конструкції із дискретних матеріалів. Ґрунт земляного полотна прийемо суглинок важкий пилуватий з розрахунковою вологістю  $0,6W_L$ . За цією вологістю модуль пружності ґрунту  $E_{\text{осн}} = 62 \text{ МПа}$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi = 20^\circ$ , зчеплення  $c = 0,03 \text{ МПа}$ . (рис.2)

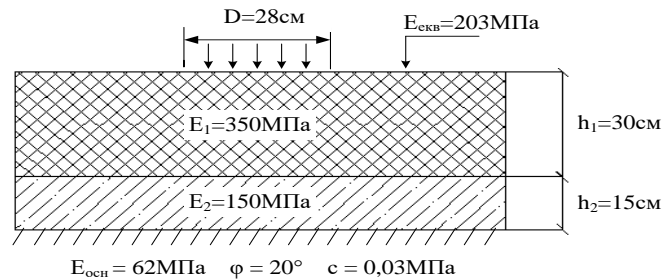


Рис. 2 Конструкція дорожнього одягу

Розрахункові характеристики шарів дорожнього одягу: щебінь з осадових і метаморфічних порід, фракція 40-70мм з розклинюванням фракціями 20-40мм і 10-20 мм,  $E_1 = 350 \text{ МПа}$ , середньозважений розмір скелетоутворюючої фракції  $d_{\text{сеп}}^{\text{III}} = 52 \text{ мм}$ , товщина шару  $h_1 = 30 \text{ см}$ ; сортовий гравій дрібний  $E_2 = 150 \text{ МПа}$ , розмір фракції  $d_2 = 25 \text{ мм}$ , товщина шару  $h_2 = 15 \text{ см}$ ,  $E_{\text{скв}} = 203 \text{ МПа}$ .

Середній розмір скелетоутворюючої фракції та відносну товщину двошарової системи:

$$d_{\text{сеп}} = \frac{h_1 \cdot d_1 + h_2 \cdot d_2}{h_1 + h_2} = \frac{300 \cdot 52 + 150 \cdot 25}{300 + 150} = 43 \text{ мм.}$$

$$n_2 = \frac{h_1 + h_2}{d_{\text{сеп}}} = \frac{300 + 150}{43} = 10,5.$$

Визначаємо розподільчу здатність системи:

$$c = 0,50645 + 0,00682 \cdot 10,5 + (-0,0000188) \cdot 10,5^2 = 0,58.$$

Результати розрахунків на міцність наведені у зведеній таблиці 1.

Таблиця 1

Результати моделювання напруженого і деформованого станів  
конструкцій перехідного типу

h, см	n	$E_{пр}$ , МПа	$E_{екв}$ , МПа	«С»	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_3$ , МПа	$\tau_a$ , МПа	$\tau_{max}$ , МПа
30	6	350	203	0,55	-0,147	-0,487		
15	10,5	150		0,58	-0,017	-0,257		
-		62			-0,008	-0,154	<b>0,107</b>	<b>0,086</b>
30	6	350	203	1,0	-0,341	-0,487		
15	10,5	150			-0,0075	-0,125		
-		62			-0,0051	-0,063	<b>0,047</b>	<b>0,0529</b>

Достовірність розробленої методики є перевіреною чисельно за допомогою апробованого рішення теорії пружності при граничних умовах [2,3,4].

Врахування особливостей поведінки дискретних матеріалів під навантаженням шляхом підрахунку кількості рядів в шарах конструкції з подальшим встановленням коефіцієнту розподільчої здатності дискретного матеріалу дозволило розрахувати НДС конструкцій як систему з контактною взаємодією. При цьому умова міцності на зсув не виконується, так як нормальні напруження по підшві підстиляючого шару з введенням коефіцієнту «с» збільшуються до 26%. Це призводить до збільшення активних напружень зсуву на поверхні ґрунтової основи. Умова міцності у цьому випадку не виконується. В таких конструкціях відбудеться передчасне руйнування - зсув по підшві конструкції.

Якщо враховувати запропоновані особливості дорожніх одягів із дискретних матеріалів шляхом введення коефіцієнту «с», то необхідним заходом для виконання умови міцності є збільшення товщини конструктивних шарів (збільшення кількості розрахункових рядів та збільшення коефіцієнту розподільчої здатності).

### Список використаних джерел

1. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве.- М.: Стройиздат, 1966. - 319с.
2. Павленко Н.В. Механизм распределения усилий в слоях дорожных одежд переходного типа из дискретных и малосвязных материалов, Науковий вісник будівництва, вип.52, Харків ХДТУБА ХОТВ АБУ 2009, с.113-116.
3. Павленко Н.В. Усовершенствование расчета малосвязных материалов в конструкциях дорожных одежд переходного типа. Проблемы развития городской среды: Научно-технический сборник/-К.:НАУ, 2012.- Вип.7. – с.177-181.

4. Павленко Н.В., Ряпухін В.М., Плевако В.П. Напружений і деформований стани дорожніх одягів перехідного типу з дискретних матеріалів // Науковий вісник будівництва / Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2008. – Вип.47. – С.161-171.
5. ВБН В.2.3-218-186-2004 «Дорожній одяг нежорсткого типу».

#### **Аннотация**

Усовершенствован метод расчета дорожных одежд из дискретных и малосвязных материалов для оценки прочности конструкций на сдвигоустойчивость по подошве подстилающего слоя. Для описания напряженно-деформированного состояния системы используются уравнения, учитывающие распределительную способность несвязного материала. Представлена методика определения параметра разрешения и его практическое внедрение при расчете конструкций.

Ключевые слова: механизм контактного взаимодействия, напряжение, дискретные материалы, разрешение, оценка прочности.

#### **Annotation**

Improved method for calculating the pavement of the discrete and malosvyaznih materials to assess the strength of structures on the underside of sdvigoustoychivost underlayment. To describe the stress-strain state of the system equations are used, taking into account the distribution capacity of disconnected material. The technique permits determination of the parameter and its practical application in the calculation of structures.

Keywords: mechanism of contact interaction, the voltage, discrete material, resolution, evaluation of strength.