УДК 624.138.2.678.063

ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ҐРУНТУ

Довжик М.Я., к.т.н., доцент; **Соларьов О.О.,** к.т.н., ст. викладач
(Сумський національний аграрний університет)

В статті розглянуто механізми ущільнення ґрунту, процеси, які виникають у ньому під час контакту з колесом, тобто загальний процес деформації та ущільнення, яке не лише на поверхні, а й те, що розповсюджується вглиб масиву. Напруження, які виникають у товщі родючого шару, розповсюджуються вглиб масиву, цим самим утруднюючи вільний доступ вологи до кореня рослини. На сьогоднішній день існує досить багато різноманітних моделей деформації ґрунту, що знайшли своє використання, найрозповсюдженіші розглянуті далі в статті.

Ключові слова: напруження у ґрунті, ущільнення ґрунту під рушіями МТА, моделі напруженого стану ґрунту.

Постановка задачі. Сьогодні, поряд з класичною механікою ґрунтів, заснованою на визначенні напруженого стану ґрунту при допущенні лінійної залежності між зусиллями й деформаціями, застосовується багато інших методів.

Аналіз останніх досліджень. У 1801 році М.І. Фусс запропонував гіпотезу, основою якої було поняття пропорційної залежності деформацій ґрунту від навантаження. А в 1885 році Ж. Буссінеск отримав рішення задачі про розподілення напружень у ґрунті в на півпросторі від дії зосередженої сили, започаткувавши основи теорії розподілення напружень у ґрунті. У другій половині XIX століття та з приходом XX ст.. Г.Є. Паукер, М.Леві, У. Репкін, Л.Прандль створили принципи сучасної теорії граничної рівноваги сипучих середовищ [1].

До появи в літературі робіт К. Тергаці науковці розглядали ґрунти як суцільні, однорідні, однофазні, матеріали, часто вважали, що щільність та вологість у процесі деформування майже не змінюється. К.Теграрці у своїх роботах описував, що основні явища, які спостерігаються у поведінці ґрунту під час навантаження залежать від зміни кількісного співвідношення фаз ґрунту у процесі деформування та від механічної взаємодії фаз.

Мета досліджень. Метою наших досліджень є визначення оптимальної математичної моделі, яку можна використовувати в реальних умовах.

Результати досліджень. До недоліків класичної механіки ґрунтів слід віднести, що вона не давала відповіді на основне питання визначення

напруженого стану ґрунтів за межами лінійної, пружної стадії деформування.

За розрахунковими моделями М.М. Герсеванова дозволялось умовно надавати певні ідеальні властивості ґрунтам, як, припущення про рівномірний розподіл напруження за горизонтальними перерізами основи, поверхня якої навантажена [2].

В багатьох випадках недостатня надійність рішень класичної механіки ґрунтів сприяла застосуванню нового підходу до проектування – принцип граничних станів, який був вперше запропонований у 1948році групою інженерів на чолі з В.М. Келдишевим.

У підручнику «Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти» під редагуванням Н. Л. Зоценко читаємо: «Способи описати весь комплекс властивості ґрунтів за допомогою однієї моделі потребують розроблення складного математичного апарату розрахунків, проведення трудомістких експертиз для вивчення параметрів моделі і все-таки навряд чи можуть дати позитивний результат найближчими роками». Саме тому були створені численні моделі, які використовуються у механіці ґрунтів. Серед них найбільш відомими є статичні моделі, які не враховують зміни в ґрунті за часом, та реологічні моделі, які, навпаки, враховують вплив часу. Існують також більш складні моделі, що враховують взаємодію ґрунту з рідиною в його порах.

Розглянемо моделі ґрунтів, які зводяться до відношення «напруження - деформація», контактні моделі. Поділ всіх моделей можна виконати за такою ознакою: входить чи ні в їх рівняння час. Моделі, які мають в своїх рівняннях залежність від часу, називають реологічними. В основному їх беруть зі статичних моделей, в яких час не беруть до уваги з додаванням в'язкості, подібно до моделей Максвелла чи Бінгама [3, 4]. Існують і більш складні t-моделі, які не виводяться прямо із статичних. Детально в своїх працях описують моделі Вялов С.С. [5], Зарецький Ю.К., Мартиросян З.Г.[6].

У такій науці як реологія, пружні, в'язкі та пластичні властивості тіл моделюють набором механічних елементів, які з'єднують паралельно чи послідовно. Такі моделі частіше всього моделюють, як ідеально пружне тіло (підкорюється закону Гука); модель із в'язкими властивостями та ідеально пластичним тілом – Сен-Венома [7].

Розходження, яке виникає між дійсними властивостями ґрунтів та їх моделями призвели до виникнення багатоелементних моделей з великою кількістю пружних та в'язких елементів.

Інший загальний поділ пов'язаний із встановленням залежності «напруга-деформація». З урахуванням того, що ґрунт є не суцільним, а дискретним середовищем, його реальною моделлю може бути та, яка описує взаємодію окремих частинок з урахуванням фізичного виду зв'язків між ними. У загальній літературі цей напрям має назву мікропідходу.

Альтернативою цій моделі є макропідхід, заснований на гіпотезі про безперервність ґрунтового середовища.

Континуальні моделі, які звичні для механіки суцільного середовища, можна провести за такими ознаками: моделі лінійно-деформованого середовища; граничної рівноваги; моделі пружно-пластичного середовища.

Найбільш поширеними моделями в інженерній практиці механіки ґрунтів є моделі лінійно-деформованого середовища. У цих моделях, крім разового навантаження і лінійної залежності між напругами та деформацією, розглядають тільки загальну деформацію без поділу на пружну й пластичну складові [8].

Рівняння цих моделей записуються у вигляді:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu(\sigma_y - \sigma_z\right]; \;\; \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy}; \tag{1.1}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x\right]; \;\; \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{yz}; \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y\right]; \;\; \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{zx}; \tag{1.3}$$

де E – модуль загальної лінійної деформації, μ – коефіцієнт Пуассона.

Моделі теорії граничної рівноваги ґрунту відповідають умовам, коли в ґрунтовому середовищі у всіх точках виконується умова граничної рівноваги, а в елементах масиву переважають пластичні деформації (т. С графіка $S=f(\sigma)$, рис.1).

Систему рівнянь можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\tau_{xz}}{\partial z} = x; \tag{1.4}$$

$$\frac{\tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_x}{\partial z} = z; \tag{1.5}$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xz}^2 = (\sigma_x + \sigma_z + 2C \cdot ctg\varphi)^2 sin^2\varphi; \tag{1.6}$$

де C – питоме зчеплення ґрунту; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту; x, y – компоненти об’ємних сил.

Одним із недоліків даних рівнянь є те, що вони дають задовільні результати лише за умови постійності значень характеристик міцності та реформованості ґрунтів усіх елементів масиву в будь-який момент навантаження [5].

Моделі пружно-пластичного середовища та теорії пластичної течії – це набір рівнянь, які визначають границі пружної поведінки середовища та зв’язок та зв’язок деформацій та напруг за межею пружної області. Базою для них є диференціальні співвідношення між напругами та деформаціями й можуть ураховувати закономірності зміни механічних властивостей ґрунту як у процесі експерименту, так і в натурних умовах.

Компоненти деформацій та напруг у цих моделях поділяють на пружні й пластичні складові лінійних та кутових деформацій.

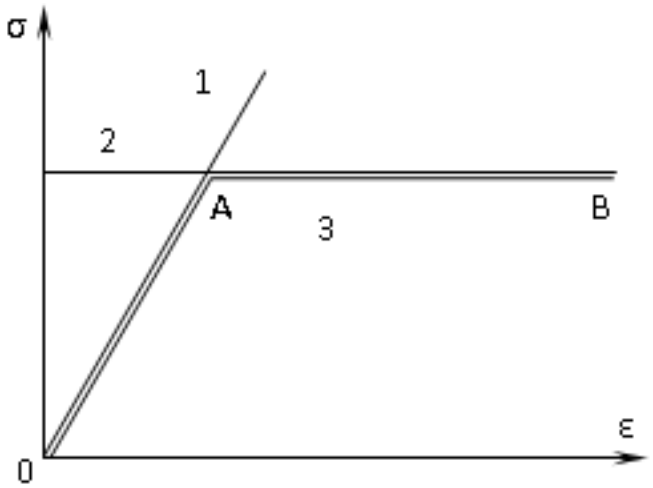

Рис. 1. Типовий вигляд графіків залежності між напругами (σ) та деформаціями (ε) моделей ґрунтів: 1 – лінійно деформованого середовища; 2 – жорстко-пластичного тіла; 3 – пружно-пластичного тіла (діаграма Прандтля)

Лінія 3 на рис.1 показує властивості досить поширеної моделі ідеального пружно-пластичного тіла. У цій моделі межі пропорційності, текучості та міцності збігаються в точці *A*.

Сучасні задачі механіки ґрунтів дуже різноманітні, але не дозволяють в повному обсязі відповісти на більшість практичних питань.

У роботах М.Л. Зоценка детально розглянуто процес деформації ґрунтів від дії на нього місцевого зростаючого навантаження [5]. Під час взаємодії на поверхню ґрунту жорсткого штампу фундаменту виникає складний напружений стан, який суттєво відрізняється від компресійного стиснення, бо ґрунт крім нормальних відчуває і дотичні напруження, які при досягненні певної величини можуть викликати незворотні зрушення.

Залежність між напруженням σ і відносною деформацією ґрунту ε має досить складний характер [5]. На графіку (рис. 2) виділено три зони. Перша зона – ділянка *OB*. Тут виникають переважно пружні деформації. У межах цієї ділянки знаходиться так звана структурна міцність ґрунтуσ_s - напруження, до якої має місце лінійна залежність між σ і ε (відрізок *OA*).

Якщо напруження перевищує величину σ_s, відбувається ущільнення ґрунту за рахунок зменшення його пористості. При подальшому збільшенні напруження (ділянка *BC*) ґрунт ущільнюється інтенсивніше, хоча вплив дотичних напружень поки ще незначний, тому частки ґрунту переміщаються, в основному, вниз і не зміщуються в сторони.

Вплив тиску поширюється на велику глибину. Глибина проникнення тиску залежить від щільності ґрунту: чим вище щільність, тим глибше проникає тиск. Але й на цій ділянці залежність між напруженням і осадкою ґрунту (деформацією) звичайно приймається лінійною. Ця фаза вважається безпечною навіть при розрахунках фундаментів.

Подальше збільшення навантаження викликає пластичні деформації. При напруженнях, які відповідають ділянці *CD*, відбувається різке осідання ґрунту, видавлювання його в сторони і нагору. Починається процес руйнування. У цьому випадку під дією зростаючих дотичних напружень розвиваються зсуви ґрунту по так званим лініям ковзання. Ґрунт знаходиться в пластичному стані або в стані повзучості. Фактично він поводиться, як дуже в'язка рідина. У будівництві ця фаза викликає катастрофи. Якщо подібні явища розвиваються під колесами машин, що працюють на полях, вони буксують, осідають, і тоді виникає потреба в додатковій техніці у вигляді тягачів, щоб звільнити поле від руйнівної атаки.

Досвід показує, що в межах ділянок *OB* і *BC* ґрунт поводиться, як суцільний матеріал. Напруження зменшуються (розсіюються) в міру віддалення від місця навантаження як углиб, так і в сторони. В зв’язку з тим, що частинки ґрунту дуже малі, реальні сили, які діють між ними, можна замінити умовними силами, розподіленими за об'ємом. Ці внутрішні зусилля, як відомо, називаються напруженнями. Закономірність їх розподілу залежить від величини і характеру зовнішнього навантаження.

Отже, для оцінки напружено-деформованого стану ґрунту в нашому випадку можна використовувати положення механіки суцільного середовища.

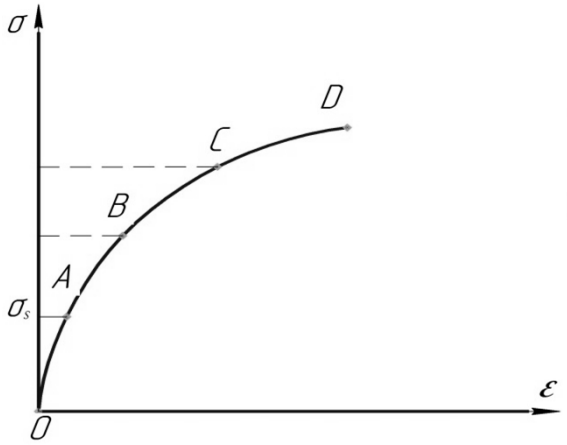

Рис. 2. Залежність між напруженням і деформацією ґрунту

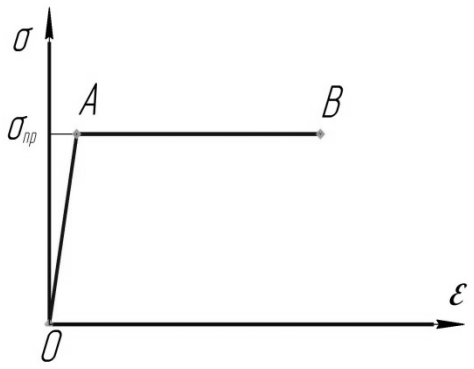

Рис. 3. Діаграма ідеального пружно-пластичного матеріалу

Висновок. З огляду на поведінку ґрунту під навантаженням, яка характеризується графіком на рис. 3, робимо висновок, що в даному випадку застосована теорія лінійно деформованого середовища, згідно з якою деформації змінюються прямо пропорційно напруженням, тобто ґрунт, як досить пружний матеріал, підкоряється закону Гука. Тому в даному випадку можна використовувати математичний апарат теорії пружності.

Відомо, що розрахунки, на основі теорії пружності виконуються в інтервалі напружень, при яких середовище вважається суцільним, однорідним, ізотропним і не деформується в часі. Відносно ґрунту це справедливо лише з певним наближенням. У зв'язку з цим були зроблені спроби створення більш точних механічних моделей ґрунту. Такими моделями є, наприклад, реологічні, які враховують тимчасові явища.

Список літератури.

1. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / [Зоценко М. Л., Коваленко В. І. та ін.]; за ред. М. Л. Зоценко. – Полтава: ПНТУ, 2003. – 554 с.
2. Герсеванов Н. М. Основы динамики грунтовой массы / Н. М. Герсеванов. – М.–Л.: Госстройиздат, 1933. –197 с.
3. Mitsoulis E. Flows of viscoplastic materials: models and computations / E. Mitsoulis // Rheology Reviews. – 2007. –№ 1. – P. 135-178.
4. Moczo P. Lecture Notes on Rheological Models / Peter Moczo, Jozef Kristek, Peter Franek. – Bratislava: DAPEM FMPI CU, 2006. – 40 p.
5. Інженерна геологія: Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: підручник для вузів / М. П. Зоценко, В. І. Коваленко та ін. – К.: Вища школа, 1992. – 408 с.
6. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов / Ю. К. Зарецкий. – Ростов на Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. – 608 с.
7. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
8. Пьянков С. А. Механика грунтов: учебн. пос. / С. А. Пьянков, З. К. Азизов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 103 с.

В статье рассмотрены механизмы уплотнения почвы, процессы, возникающие в нем при контакте с колесом, то есть общий процесс деформации и уплотнения, не только на поверхности, но и то, что распространяется вглубь массива. Напряжения, возникающие в толще плодородного слоя, распространяются вглубь массива, тем самым затрудняя свободный доступ влаги к корню растения. На сегодняшний день существует достаточно много различных моделей деформации грунта, нашли свое применение, распространенные рассмотрены далее в статье.

The article discusses the mechanisms of soil compaction, the processes that occur in it when in contact with the wheel, that is, the general process of deformation and compaction, not only on the surface, but also that which extends into the bulk of the array. The stresses arising in the thickness of the fertile layer spread into the bulk of the massif, thereby hampering the free

access of moisture to the root of the plant. To date, there are many different models of soil deformation, have found their application, common are discussed further in the article.

Keywords: tension in the soil, soil compaction with MTU movers, models of the elastic state of the soil.