

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ПОВЕРХНІ ОСІДАННЯ В ЗАДАЧАХ РОЗРАХУНКУ ПЛИТНИХ ФУНДАМЕНТІВ НА ПІДРОБЛЮВАЛЬНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Нерівномірні деформації від підроблення проявляються у вигляді мульди зрушення, що виникає при перерозподілі напружень в зоні навколо виробки. Якнайточніше визначення кривої осідання мульди зрушення має важливе значення для задач розрахунку та проектування плитних фундаментів на підроблювальних територіях. Метою роботи являється знаходження оптимального рівняння кривої осідання для застосування його в задачах проектування та розрахунку плитних фундаментів на підроблювальних територіях. Форма, розміри мульди зрушення та її розташування залежать від товщини пласту, його кута падіння, розмірів виробленого простору. Розрахунок плитних фундаментів зводиться до визначення прогинів плити, а також згинаючих моментів та внутрішніх зусиль. Прогин плити в теорії розрахунку описується бігармонічним рівнянням, що містить подвійний оператор Лапласа. Будівельні нормативи передбачують радіусоподібне (фактично параболічне) викривлення земної поверхні від підроблення. При підстановці цієї моделі в бігармонічне рівняння вона спрощується (четверта похідна дорівнює нулю). Це означає, що викривлення від підробітки не буде мати вплив на викривлення плити, що не відповідає дійсності. Тому постає питання знаходження такої математичної моделі мульди зрушення, що було б доцільніше застосовувати в задачах розрахунку. Доцільні моделі кривої осідання є в теорії зрушення гірських порід та маркшейдерії. Авторами було проведено порівняння математичних моделей кривої мульди осідання з визначенням найоптимальнішої. Найбільшу відповідність до будівельних норм, згідно проведених досліджень показує модель кривої осідання за С.Г. Авершиним (величина достовірності апроксимації найбільша).

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Фундаментна залізобетонна плита є найважливішим елементом промислового, цивільного, гідротехнічного та інших видів будівництва. У складних інженерно-геологічних умовах будівництва навантаження з боку основи на фундаментну плиту передаються, як правило, в період експлуатації об'єкту. Це призводить до розвантаження окремих ділянок плити та довантаження інших ділянок. Навантаження, таким чином, має явно складний характер, що повинно враховуватись при визначенні напружено-деформованого стану фундаментної плити, між іншим, конструкції фундаментних плит, що б враховували спільні непружні деформації залізобетону та ґрунту, в наш час відсутні [1,2].

Для реалізації наявних резервів несучої здатності фундаментних плит та підвищення їх економічності при збереженні необхідної надійності, необхідне всебічне врахування характерних особливостей спільної роботи фундаментної плити та нерівномірно-деформованої основи [1,2].

Нерівномірні деформації від підроблення проявляються у вигляді мульди зрушення, що виникає при перерозподілі напружень в зоні навколо виробки [3-5]. Якнайточніше визначення кривої осідання мульди зрушення має важливе значення для задач розрахунку та проектування плитних фундаментів на підроблювальних територіях.

Нормативи [6,7] апроксимують криву осідання як параболу, тоді як в маркшейдерській справі вона має більш точний математичний опис.

Аналіз досліджень і публікацій. Розробці методики розрахунку плитних фундаментів в умовах нерівномірно-деформованої основи приділялася увага в роботах С.М. Клепікова, О.О. Петракова, В.І. Обозова, Р.О. Тімченка, Д.А. Крішка та ін. Зокрема, розрахунок круглих фундаментів, які використовуються в конструкціях баштових споруд (димових труб, водонапірних башт, силосних корпусів), в таких умовах розглядався Клепіковим та Тімченком [1,2,8].

Дослідження форми мульди зрушення показано в роботах [9-12]. Порівняння їх аналітичних описів подано в роботі [13].

Постановка завдання. Метою роботи являється знаходження оптимального рівняння кривої осідання для застосування його в задачах проектування та розрахунку плитних фундаментів на підроблювальних територіях.

Викладення матеріалу та результати. При виїмці частини пласту на значній глибині процес зрушення гірських порід досягає поверхні землі та викликає її деформацію. Частина поверхні землі, що викривилася має назву мульда зрушення.

Форма, розміри мульди зрушення та її розташування (рис. 1) залежать від товщини пласту,

його кута падіння, розмірів виробленого простору. При горизонтальному заляганні пласту та його значній глибині мульда зрушення має симетричну форму щодо виробки.

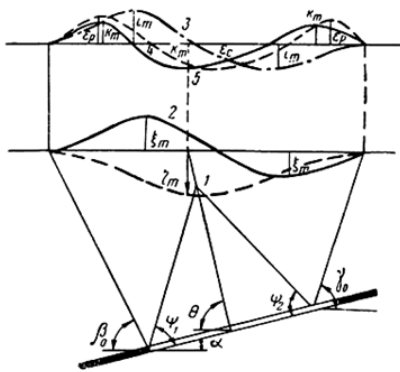


Рис. 1. Мультда зрушення при повній виробці: 1 - вертикальні осідання; 2 - горизонтальні зміщення; 3 - нахили; 4 - кривизна; 5 - горизонтальні деформації

Розрахунок плитних фундаментів зводиться до визначення прогинів плити, а також згинаючих моментів та внутрішніх зусиль. Нормативи [6,7] передбачають радіусоподібне (радіус кривизни R) викривлення земної поверхні від підроблення (рис. 2).

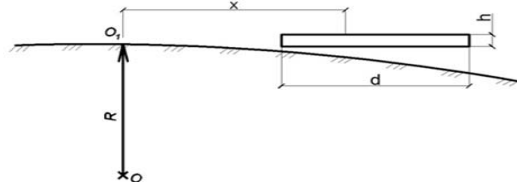


Рис. 2. Фундаментна плита при радіусоподібному викривленні

Щоб розглянути розрахунок фундаментної плити в умовах підроблювальних територій задамося початковими параметрами: кругла фундаментна плита діаметром d та висотою h , яка вироблена з матеріалу з модулем пружності E та коефіцієнтом Пуассона ν . На плиту діє вертикальне навантаження інтенсивністю q . Ґрунт основи описується пружною моделлю.

Вигин круглої плити описується наступним бігармонічним рівнянням [14]

$$\nabla^2 (D \nabla^2 Z) + KZ = q, \quad (1)$$

де ∇^2 - оператор Лапласа, який в полярних координатах записується так

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, \quad (2)$$

де $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ - циліндрична жорсткість плити; Z - вертикальне переміщення точок плити відносно початкового положення; $K = p_{сер}/S$ - коефіцієнт жорсткості основи; ν - коефіцієнт Пуассона; $p_{сер}$ - середній тиск під підошвою фундаменту; S - осідання поверхні основи від навантаження.

Плита лежить на пружній основі та вдавлюється під дією навантаження. При викривленні основи виникають додаткові вертикальні переміщення плити, що залежать від величини та характеру викривлення (рис. 3).

Рис. 3. Переміщення точок плити



Повні переміщення точок плити можна представити у вигляді суми [15]

$$Z(r, \theta) = w(r, \theta) + \eta(r, \theta), \quad (3)$$

де $w(r, \theta)$ - вертикальні переміщення точок плити від дії навантаження на плиту; $\eta(r, \theta)$ - вертикальні переміщення плити від викривлення поверхні землі.

Згідно [6,7] розрахункове осідання будь-якої точки основи, що викликане кривизною земної поверхні необхідно визначати за формулою

$$\eta = n_k m_k (x^2/2R), \quad (4)$$

де n_k та m_k - коефіцієнти перевантаження та умов роботи, що приймаються за відповідними таблицями; R - очікуваний радіус викривлення земної поверхні; x - відстань від точки, що розглядається до центру викривлення.

Наявність двох операторів Лапласа в рівнянні (1) передбачує наявність похідної четвертого порядку. Очевидно, що $\eta^{(IV)}=0$. Це означає, що викривлення від підробітки не буде мати вплив на викривлення плити, що не відповідає дійсності. Тому постає питання знаходження такої математичної моделі мульди зрушення, що було б доцільніше застосовувати в задачах розрахунку.

З викладеного випливають такі вимоги до математичних моделей:

математична модель поверхні мульди повинна мати відповідні похідні без розривів (нахил $i(x)=\eta'$, та кривизну $k(x)=\eta''$), що б в свою чергу мали б такий фізичний зміст як на рис. 1;

математична модель повинна мати відмінну від нуля, нерозривну похідну четвертого ступеня; математична модель повинна якнайточніше апроксимувати модель означену в нормативах [6,7] (формула 4).

У маркшейдерській справі відомі такі моделі мульди осідання [13]. Рівняння кривої осідання за С.Г. Авериним

$$\eta(x) = \eta_{\max} \left(1 - \frac{x}{2,13l}\right)^{4,54} \cdot e^{2,13x/l} = \eta_{\max} \left(1 - \frac{x}{2,13l}\right)^{4,54} \cdot e^{4,54z}, \quad (5)$$

де η_{\max} - максимальне осідання; l - відстань від точки максимального осідання до точки перегину кривої осідання (рис. 4); $z=x/L$; $L=2,13l$ - напівмульда.

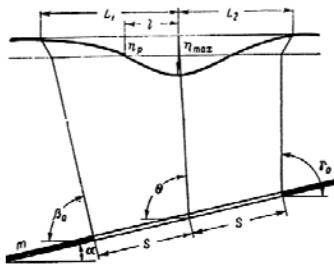


Рис. 4. Схема до визначення кривої осідання

Рівняння осідання за С.П. Колбенковим

$$\eta(x) = \eta_{\max} b \left(1 - z + \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi z)\right). \quad (6)$$

Сімейство рівнянь для опису кривих осідань

$$\eta(x) = \eta_{\max} b (\Phi(t) + \Phi(u)), \quad (7)$$

де $b=1/2\Phi(t_0)$; $\Phi(u)$, $\Phi(t)$, $\Phi(t_0)$ - інтеграл ймовірностей Лапласа; $t_0=3,5n-0,75$; $t=t_0+rz$; $u=t_0-rz$; $r=3,35n+2,15$; n - коефіцієнт підробленості.

В табл. 1 показано результати розрахунку кривої осідання за трьома варіантами моделювання в діапазоні z від -1 до 1. При цьому $\eta_{\max}=1$; $n=1$. На рис. 5-7 показано криві осідання, нахилу та кривизни для відповідних моделей.

Таблиця 1

Розрахунок параметрів мульди

$z = x/L$	Варіант I			Варіант II			Варіант III		
	$\eta(z)$	$i(z)$	$k(z)$	$\eta(z)$	$i(z)$	$k(z)$	$\eta(z)$	$i(z)$	$k(z)$
-1	-0,2483	0,5636	0,9977	-1	-0,2483	0,5636	0,9977	-1	-0,2483
-0,9	-0,3098	0,6661	1,0430	-0,9	-0,3098	0,6661	1,0430	-0,9	-0,3098
-0,8	-0,3816	0,7699	1,0189	-0,8	-0,3816	0,7699	1,0189	-0,8	-0,3816
-0,7	-0,4635	0,8665	0,8917	-0,7	-0,4635	0,8665	0,8917	-0,7	-0,4635
-0,6	-0,5542	0,9436	0,6235	-0,6	-0,5542	0,9436	0,6235	-0,6	-0,5542
-0,5	-0,6510	0,9852	0,1773	-0,5	-0,6510	0,9852	0,1773	-0,5	-0,6510
-0,4	-0,7494	0,9721	-0,4750	-0,4	-0,7494	0,9721	-0,4750	-0,4	-0,7494
-0,3	-0,8429	0,8831	-1,3392	-0,3	-0,8429	0,8831	-1,3392	-0,3	-0,8429
-0,2	-0,9229	0,6983	-2,3812	-0,2	-0,9229	0,6983	-2,3812	-0,2	-0,9229
-0,1	-0,9789	0,4040	-3,5063	-0,1	-0,9789	0,4040	-3,5063	-0,1	-0,9789
0	-1,0000	0,0000	-4,5400	0	-1,0000	0,0000	-4,5400	0	-1,0000
0,1	-0,9760	-0,4923	-5,2218	0,1	-0,9760	-0,4923	-5,2218	0,1	-0,9760
0,2	-0,9003	-1,0218	-5,2265	0,2	-0,9003	-1,0218	-5,2265	0,2	-0,9003
0,3	-0,7731	-1,5043	-4,2364	0,3	-0,7731	-1,5043	-4,2364	0,3	-0,7731
0,4	-0,6046	-1,8300	-2,0862	0,4	-0,6046	-1,8300	-2,0862	0,4	-0,6046
0,5	-0,4161	-1,8890	1,0201	0,5	-0,4161	-1,8890	1,0201	0,5	-0,4161
0,6	-0,2379	-1,6200	4,2822	0,6	-0,2379	-1,6200	4,2822	0,6	-0,2379
0,7	-0,1015	-1,0749	6,2680	0,7	-0,1015	-1,0749	6,2680	0,7	-0,1015
0,8	-0,0254	-0,4604	5,4835	0,8	-0,0254	-0,4604	5,4835	0,8	-0,0254
0,9	-0,0017	-0,0701	2,0859	0,9	-0,0017	-0,0701	2,0859	0,9	-0,0017
1	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000

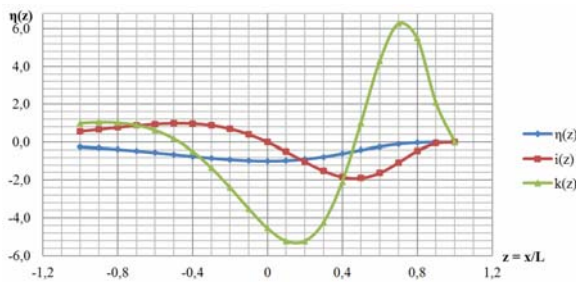


Рис. 5. Криві осідання, нахилу та кривизни для моделі I

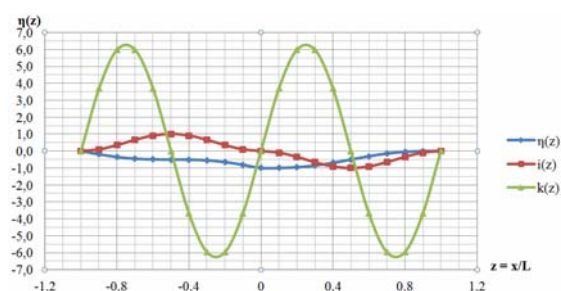


Рис. 6. Криві осідання, нахилу та кривизни для моделі II

Проаналізуємо отримані дані згідно вимог. Очевидно, що всі моделі мають першу, другу, третю та четверту похідні, які до того ж нерозривні.

Похідні першого та другого порядку для варіантів I та III показують відповідність фізичному змісту величин, які вони відображають.

А ось друга похідна моделі за варіантом II некоректно відображає фізичний зміст кривизни, тому з подальшого аналізу її можна виключити.

Розглянемо тепер криві осідання за I та III варіантом на предмет відповідності їх до будівельних норм. Апроксимацію кривих осідання за формулою (4) показано на рис. 8.

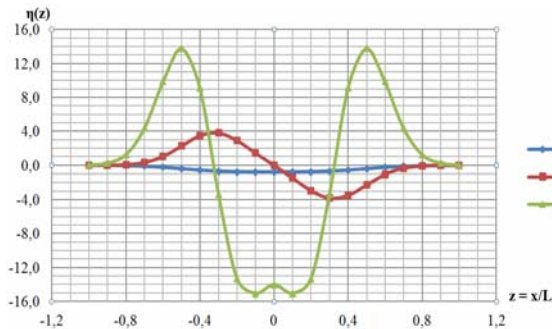


Рис. 7. Криві осідання, нахилу та кривизни для моделі III

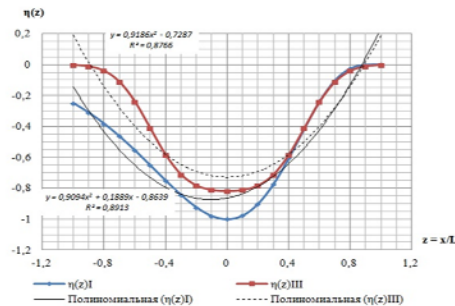


Рис. 8. Апроксимація кривих осідання параболою

Висновок та напрямок подальших досліджень. Отримані результати свідчать про те, що застосування параболічної моделі мульди осідання для розрахунку та проектування фундаментів на підроблювальних територіях не дозволяє в повній мірі врахувати деформацію фундаментної плити від осідання земної поверхні.

Для виправлення цього недоліку більш доцільно використовувати моделі осідання, що відомі в галузі маркшейдерської справи.

Найбільшу відповідність до будівельних норм, згідно проведених досліджень показує модель кривої осідання за С.Г. Авершиним (величина достовірності апроксимації найбільша).

Список літератури

1. Тимченко Р.А. Применение программ МКЭ для моделирования работы системы „основание – инженерное сооружение“ в условиях неравномерных деформаций основания / Р.А. Тимченко // Вісник Криворізького технічного університету, 2008. - Кривий Ріг: КТУ. - Вип. 21. - С. 113-116.
2. Тимченко Р.А. Предельные деформационные воздействия для круглых плитных фундаментов / Р.А.Тимченко// Современные проблемы строительства. – Донецк, 2005. – С. 173-177.
3. Бахурин И.М. Сдвигание горных пород под влиянием горных разработок / И.М. Бахурин. – Л.: Гостопиздат, 1946. – 228 с.
4. Костерин М.А. Сдвигание горных пород / М.А. Костерин. – Иркутск.: б.и., 1977. – 64 с.
5. Борщ-Компаниец В. И. Геодезия. Маркшейдерское дело / В. И. Борщ-Компаниец. – М.: Недра, 1989. – 511 с.
6. ДБН В. 1.1.-5-2000. Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідних ґрунтах (Частина 1. Будинки і споруди на підроблюваних територіях). – Київ.: Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України, 2000. - 70 с.
7. Руководство по проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. Часть III: Башенные, транспортные и заглубленные сооружения, трубопроводы // Донецкий ПромстройНИИпроект, НИИСК. – М.: Стройиздат, 1986. – 225 с.
8. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на деформируемом основании / С. Н. Клепиков. - К.: НИИСК, 1996. – 24 с.
9. Муллер Р. А. Влияние горных выработок на деформацию земной поверхности / Р. А. Муллер. - Москва: Углетехиздат, 1958. - 76 с.
10. Кратч Г. Сдвигание горных пород и защита подрабатываемых сооружений / Г. Кратч. - М.: Недра, 1978. – 494 с.
11. Авершин С. Г. Сдвигание горных пород при подземных разработках / С. Г. Авершин. - М.: Углетехиздат, 1947. – 244 с.
12. Кодунов Б.А., Лященко М.А. Исследование формы мульды сдвигания горных пород и земной поверхности // Збірник матеріалів регіональної науково-практичної конференції “Дні науки - 2011”, Красноармійськ, 2011. - т.1, С. 108-111
13. Маркшейдерское дело / [под. ред. д.т.н. Д.Н. Оглобина]. - М.: Недра, 1972. - 590 с.
14. Варвак П. М. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций / П. М. Варвак, Л. П. Варвак. – М.: Стройиздат, 1977. – 154 с.
15. Методика расчета круглых плит на деформируемом основании. - К.: НИИСК, 1971. - 56 с.

Рукопис подано до редакції 05.02.16