



Получена: 31.05.2019 г.

Приета: 01.07.2019 г.

СРАВНЕНИЕ НА ДЕФОРМАЦИИТЕ ПОД ИВИЧЕН ФУНДАМЕНТ ПРИ ПРИЛАГАНЕТО НА РАЗЛИЧНИ КОНСТИТУТИВНИ МОДЕЛИ

К. Илиева¹

Ключови думи: модели с двойно уякчаване, якост при малки деформации, ивичен фундамент, слягане

РЕЗЮМЕ

Съществува голям набор от конститутивни модели, чието използване в изчислителните модели води до получаването на различни деформации. Това се дължи на факта, че моделите отчитат до определена степен различни геоложки фактори. Целта на настоящата статия е да се съпоставят различните модели, за да може да се направи преценка, кой следва да бъде използван за определяне на деформациите в конкретна задача. Това ще помогне за получаване на по-точни данни по време на геотехническите анализи и съответно по-прецизно изчисление на геотехническите съоръжения. В конкретния случай, ще се сравнят деформациите под ивичен фундамент, като се използват базови геотрични и почвени параметри.

1. Въведение

Строителната почва е естествен материал, чието механично поведение се обуславя от работата ѝ като многофазна система. Наличието в почвата на твърди частици, вода, въздух и други включения (соли, органични съединения), които взаимодействат помежду си, е причината за сложна и комплексна реакция на системата при натоварване.

При изследване деформационното поведение на строителната почва се установява, че тя притежава някои характерни особености, като физическа нелинейност и дефор-

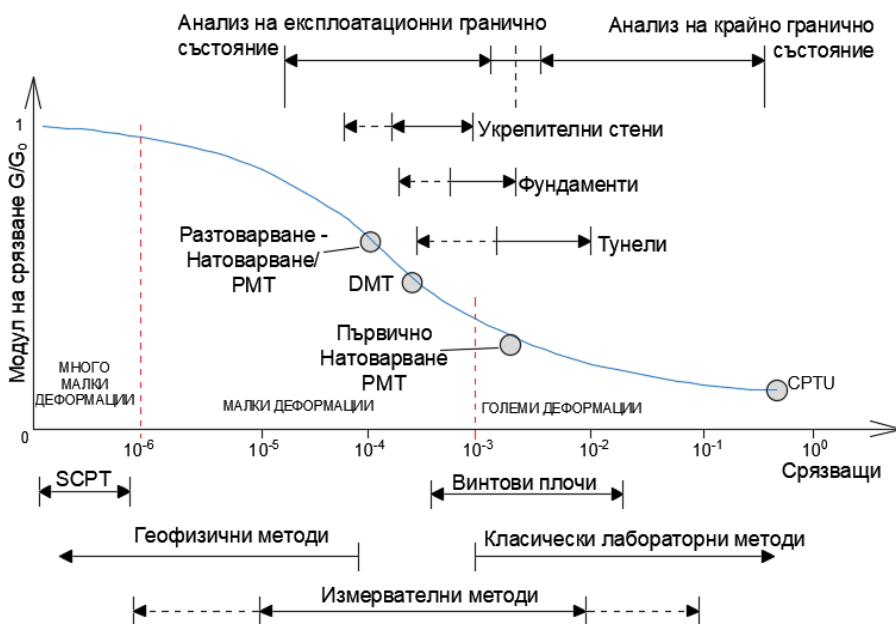
¹ Кристина Илиева, студент, фак. № 16164, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: krisi09612@gmail.com

мационно уякчаване. Вследствие на тези фактори и на нелинейното поведение се съставят различни конститутивни модели, които да определят слягането след изграждането на даденото геотехническо съоръжение. Всеки един модел включва в себе си различни „особености“ на строителната почва, което само по себе си оказва влияние върху получените резултати. В настоящата статия е направена съпоставка между основните прилагани методи в геотехническото инженерство, като е направена и съпоставка със старите „ръчни“ решения.

2. Теоретична обосновка

2.1. Взаимовръзка между коравина – деформации

Коравината на почвата намалява нелинейно с увеличаване на деформациите. Този ефект се получава вследствие на деформационното уякчаване, което отчита нарастването на напрежението при нарастването на деформациите. От своя страна с нарастването на напреженията коравината намалява. От това можем да заключим, че с нарастване на деформациите почвата губи коравина. Кривата на намаляване на коравината, представена в логаритмична скала, има характерна S-образна форма и е показана на фиг. 1 [1].

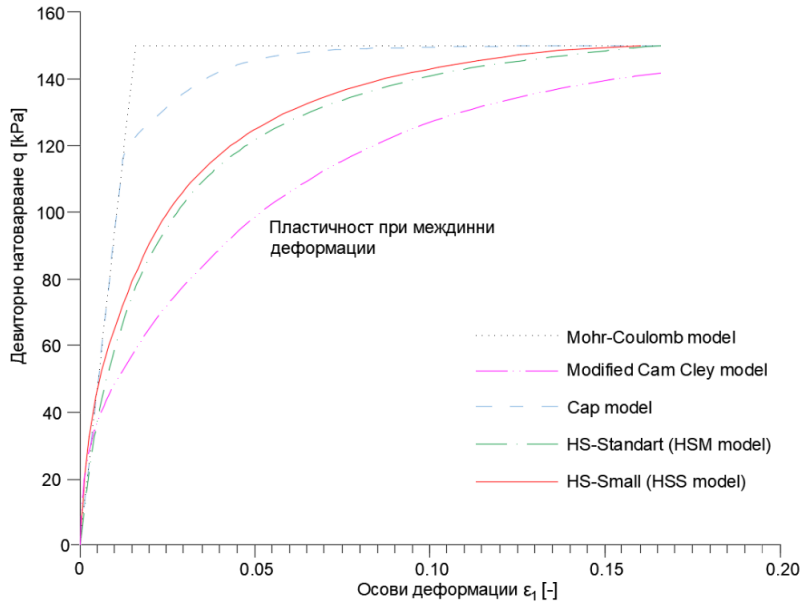


Фиг. 1. Изменение на коравината във функция на деформациите [1]

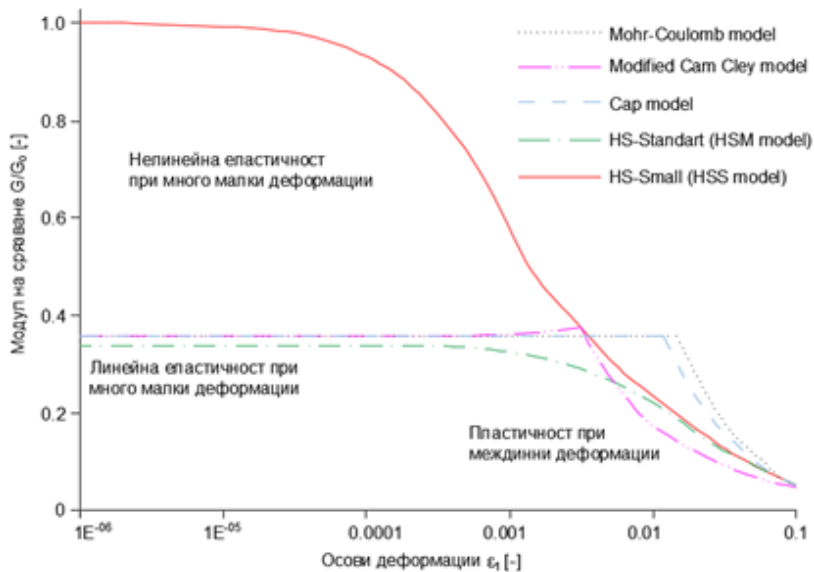
Максималната срязваща деформация, при която се проявява напълно еластично поведение, се оказва много малка – $\gamma_s < 1.10^{-6}$ (very small strain). Тази първоначална коравина се оказва много голяма и е известна още като коравина при много малки деформации (small-strain stiffness). Класическите лабораторни изследвания (триосово изпитване и компресионен опит) надеждно определят големите деформации, които са от порядъка на $\gamma_s > 1.10^{-2}$, където обаче коравината на почвата намалява до по-малко от половината на

нейната първоначална стойност. В геотехническото инженерство съоръженията, които се изграждат, реално работят с коравини на почвата, които се проявяват при деформации в диапазона между $1 \cdot 10^{-6} < \gamma_s < 1 \cdot 10^{-3}$.

2.2. Деформации при различни конститутивни модели



Фиг. 2. Връзка деформации – коравина в различните модели [1]



Фиг. 3. Връзка осови деформации – нормализиран модул на срязване в различните модели, при дренерирано триосово изпитване и използвани еквивалентни параметри [1]

В основния модел на Mohr-Coulomb се приема, че почвата работи линейно-еластично (пластифицира само при следкритично поведение), което означава, че има еднакъв модул на натоварване и разтоварване. Изменение на коравината в диапазона на очакваните деформации не може да бъде отчетено чрез Mohr-Coulomb, тъй като се дължи на нелинейните връзки в многофазната система. С нарастването на деформациите почвата значително губи своята коравина и това се проявява още в обхвата на много малките деформации. Поради връзката между коравина и деформации, описани в точка 2.2 можем да констатираме, че чрез прилагане на Mohr-Coulomb трудно бихме могли да прогнозираме точните деформации, в това число и слягания под съоръжение. Графиките, които описват обясненото до тук са дадени на фиг. 2 и фиг. 3 [1].

2.3. Модел с двойно уякчаване – Hardening soil model (HSM – model)

При този модел се разграничават два типа уякчаване – срязващо, вследствие на девиаторно натоварване, и компресионно, което се използва за моделиране на необратими пластични деформации вследствие на първичната компресия. Може да се използва за различни типове почви, като отчита намаляващата якост вследствие на девиаторно натоварване и едновременно с това поражда пластични деформации. За да се използва този модел, се изисква определянето на следните почвени параметри [2]:

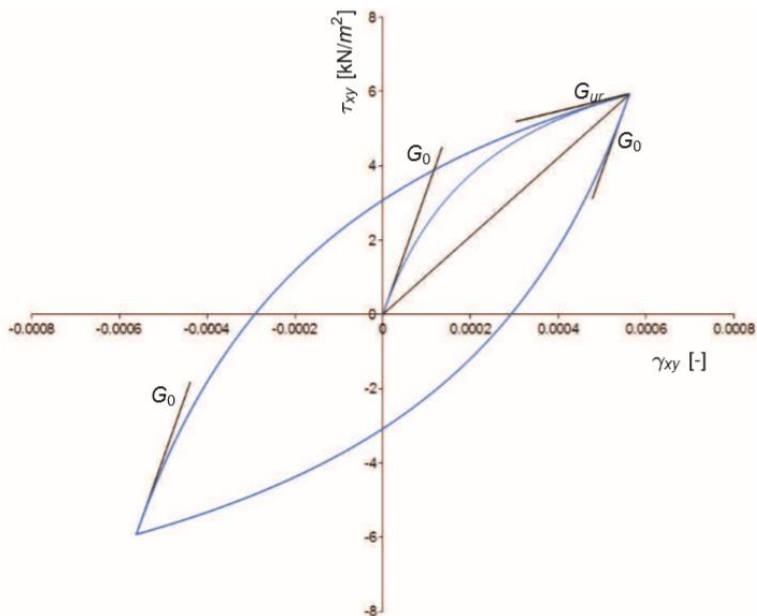
- $E_{oed,ref}$ – параметър, отчитащ появата на пластични деформации вследствие на първична компресия;
- $E_{50,ref}$ – параметър, отчитащ появата на пластични деформации вследствие на девиаторно срязване;
- $E_{ur,ref}$ – параметър, отчитащ разтоварване и повторно натоварване;
- m – коефициент, отчитащ формата на компресионната крива на почвата.

2.4. Модел с двойно уякчаване и отчитане на коравината при малки деформации – Hardening soil model with small-strain stiffness (HSS – model)

Моделът се базира на модел с двойно уякчаване. Разликата е в това, че той отчита коравината на почвата при малки деформации, чрез допълнителни два параметъра G_0 и $\gamma_{0.7}$ [4], където:

- G_0 – Модул на срязване при разтоварване, който е равен на първоначалния допирателен модул за началната крива на натоварване. Референтен модул на срязване при много малки деформации.
- $\gamma_{0.7}$ – Праг на срязване, който мащабира кривата на натоварване и разтоварване. Праг на срязващо напрежение при което $G_s = 0,722.G_0$.

На фиг. 4 [4] са илюстрирани якостните параметри, получени от циклично срязващо натоварване на дренирана проба.



Фиг. 4. Якостни параметри при циклично срязващо натоварване [4]

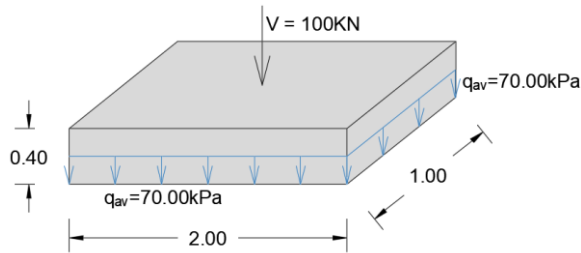
3.Решение

3.1. Общи сведения

Сляганята под единичен фундамент са определени по два различни подхода. Първи подход – „ръчно“ решение съгласно Наредба № 1 от 10 септември 1996 г. за проектиране на плоско фундиране [5] за изчисляване на слягането се предвижда прилагането на метода на послойно сумиране (МПС). В последния си вариант методът е разписан през 60-те години на миналия век. Втори подход – решение по метод на крайните елементи с помощта на съвременни конститутивни модели с програмен продукт Plaxis 2D. За изчислението по МКЕ (метод на крайните елементи), ще се разгледат и отразят параметрите на три модела – Идеално еластичен перфектно-пластичен материален модел с критерий на разрушение „Mohr-Coulomb“, модел с двойно уякчаване „Hardening soil model“ и модел с двойно уякчаване, отчитащ коравината при малки деформации „Hardening soil model with small strain stiffness“. Геометрията на модела е разгледана при първото решение, а причината това да бъде методът на послойното сумиране е историческа.

3.3. Решение по метод на послойното сумиране (БДС – НППФ 1996)

Почвената основа под фундамента е разделена на ламели с височина от 2 m, като те обхващат дълбочина от 10 m. Натоварването върху конструкцията е сумата от силата, действаща върху фундамента, и редуцираното тегло на почвата върху него. Тази сила се редуцира за основната плоскост и се изразява като равномерно разпределен товар $q_{av} = 70,00$ kPa. Геометрията и натоварването са показани на фиг. 5.



Фиг. 5. Геометрия и натоварване върху фундамента

Определянето на напреженията под средната точка на основната плоскост са съгласно предпоставките на Steinbrener, като се използва следната зависимост:

$$\sigma_{z,i} = 4 \times \alpha_i \times q_{av}.$$

Изчислението на коефициента α_i става чрез аналитичния израз:

$$\alpha_i = \left[\frac{B \times L \times D \times z}{(B^2 \times L^2 + D^2 \times z^2)} + \arctg \left(\frac{B \times L}{D \times z} \right) \right],$$

където

$$D = \sqrt{L^2 + B^2 + z^2},$$

$$L \rightarrow \infty; B = 2 \text{ m.}$$

За да се определи общият деформационен модул E_0 се използва компресионният модул E_{oed} като за всяка от ламелите са нужни осреднените напрежения. Те са пресметнати по следната зависимост:

$$\sigma_{m,i} = 0,5 \times \sigma_{z,i} + \sigma_{y,i}.$$

Компресионният модул се изчислява съгласно:

$$E_{oed,i}(\sigma_{m,i}) = \frac{d\sigma_{m,i}}{d\varepsilon_{z,i}} \left[\text{kN/m}^2 \right].$$

За определяне на $\Delta\varepsilon_{z,i}$ се използва компресионната крива, показана на фиг. 6. Съгласно [2] общият вид на израза, даващ $\Delta\varepsilon_{z,i}$ е следният:

$$\Delta\varepsilon_{z,i} = a \times (b + c \times \sigma_{m,i})^n + d,$$

където $a = 0,07695,$

$$b = 0,4675,$$

$$c = 0,00251,$$

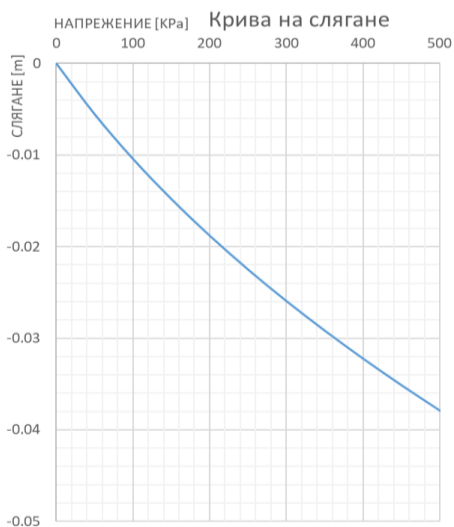
$$n = 0,3901,$$

$$d = -0,057198.$$

Уравнението придобива вида:

$$\Delta\varepsilon_{z,i} = 0,07695 \times (0,4675 + 0,00251 \times \sigma_{m,i})^{0,3901} - 0,057198.$$

Кривата е подбрана така, че при 100 kPa полученият модул е еквивалентен на приетите модули за решението по крайни елементи.

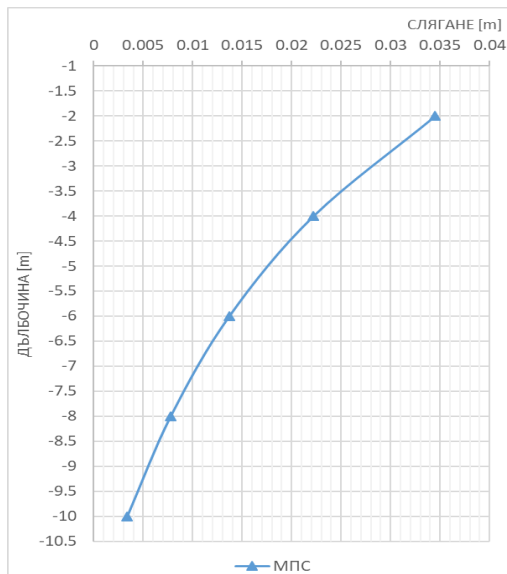


Фиг. 6. Компресионна крива

Уравнението за слягане на точка от ламела е:

$$s_{av,i} = \frac{\sigma_{z,i}}{E_{oed,i}} \times h_i .$$

След изчисление на деформациите се получава слягането, показано на фиг. 7. За конкретното решение нулевата точка е приета да е на повърхността (на -2,0 m е средата на първата ламела).



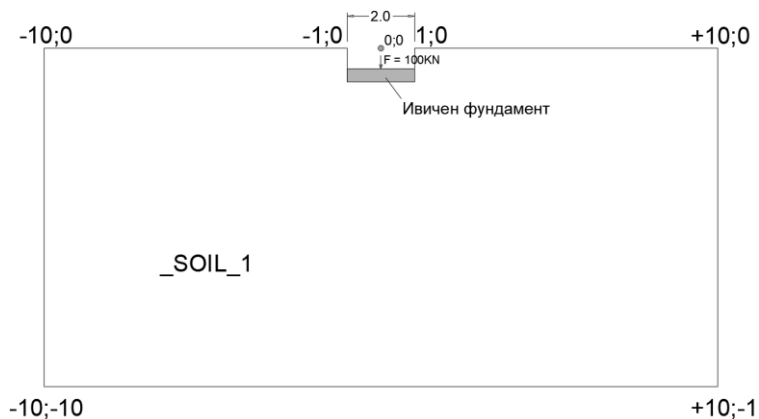
Фиг. 7. Крива на слягане на фундамента

3.4. Решение по метод на крайните елементи (МКЕ)

Решението е в равнинно напрегнато състояние. Товарите са приведени за един линеен метър.

3.4.1. Геометрия на модел

Както и по-горе, фундаментът е стоманобетонен с $B = 2$ m. Натоварен е със сила $F = 100$ kN, като в натоварването върху основната плоскост се включва и теглото на почвата над него. Тези параметри са приведени за един линеен метър. Геометричният модел, който се въвежда в програмния продукт Plaxis 2D, е представен на фиг. 8.



Фиг. 8. Графичен модел в Plaxis 2D

3.4.2. Материални параметри

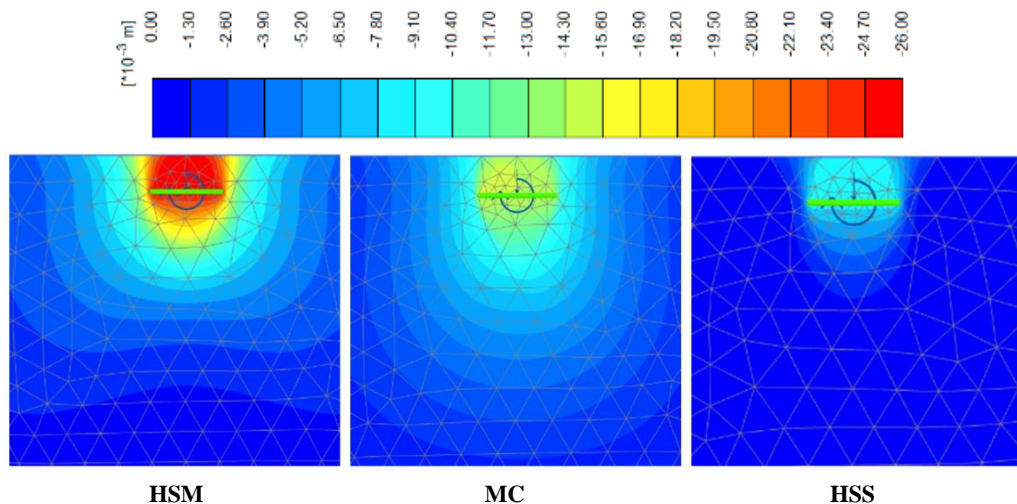
Почвените параметри са съгласно [6] и [7] и са отразени в табл. 1.

Таблица 1. Материални параметри

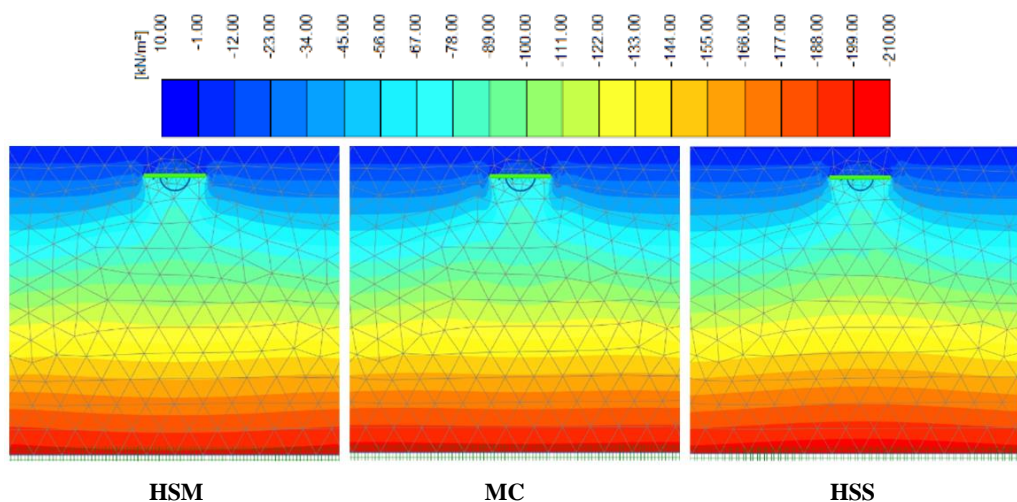
Величини, единица		MC	HSS	HSM
γ_{unsat}	kN/m ³	20	20	20
γ_{sat}	kN/m ³	22	22	22
e_{init}	-	0,5	0,5	0,5
E	kN/m ²	10,000	-	-
ν	-	0,3	-	-
G	kN/m ²	def	-	-
E_{oed}	kN/m ²	def	-	-
c	kPa	0	0	0
ϕ	°	25	25	25
ψ	°	-	-	-
$E_{50, ref}$	kN/m ²	-	10,000	10,000
$E_{oed, ref}$	kN/m ²	-	10,000	10,000
$E_{ur, red}$	kN/m ²	-	40,000	40,000
m	-	-	0,75	0,75
$\gamma_{0.7}$	-	-	0,0002	-
G_0	kN/m ²	-	100,000	-
$E_{I_{бетон}}$	kNm ² /m	1.35E ⁶	-	-
$E_{A_{бетон}}$	kN/m	100.0E ⁶	-	-

3.4.3. Резултати

Преместванията и напреженията под фундамента, получени след решение на моделите, са дадени на фиг. 9А) и фиг. 9Б).



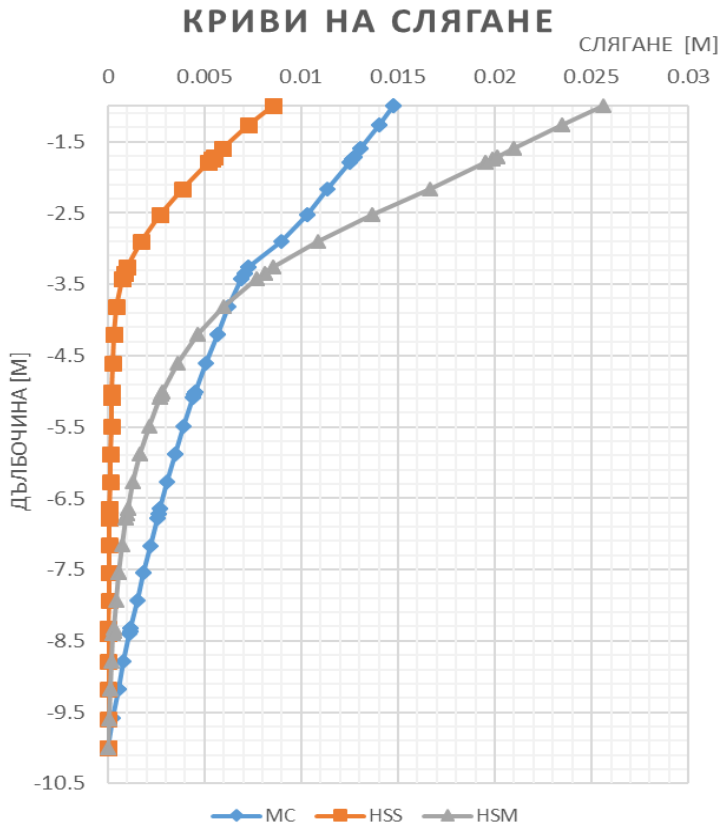
А) – Вертикални премествания – U_y , mm



Б) – Вертикални напрежения – σ_y , kPa

Фиг. 9. Деформации и напрежения под фундамента при различните модели

Изведени са деформациите за 59 точки, намиращи се под фундамента в дълбочина. Кривите на преместване на тези точки за трите модела са представени на фиг. 10. Моделът на Mohr-Coulomb показва два пъти по-големи слягания от HSS модела. Ъгълът на дилатация в HSM модела играе важна роля за определяне на коравината. В случая този ъгъл е приет 0° , поради което се получават по-големи деформации от решението с MC в първите 3 m дълбочина. По-детайлна картина и за теоретично сравнение на моделите може да бъде намерено в [8].



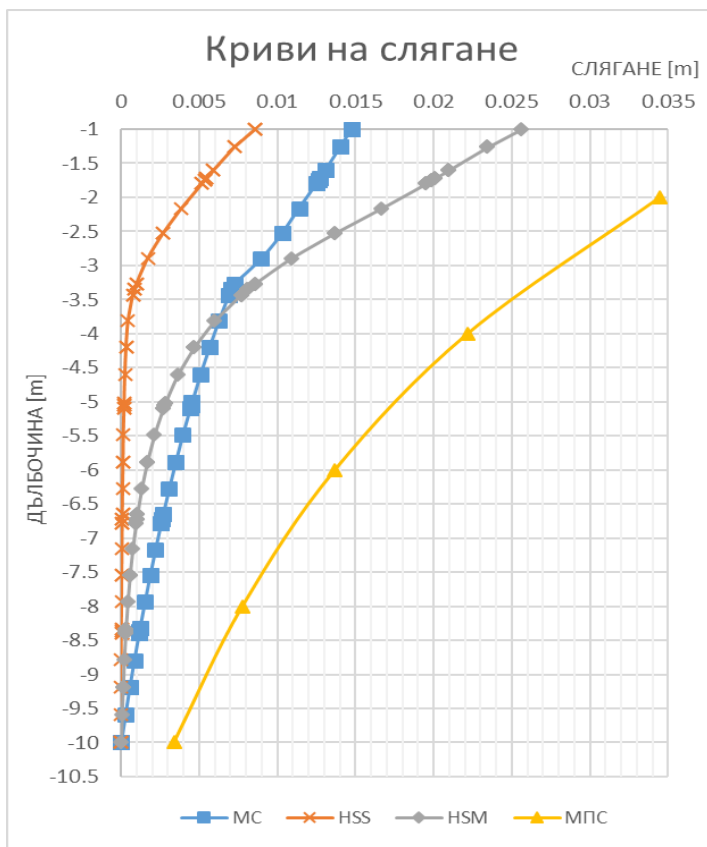
Фиг. 10. Сравнение на преместванията в дълбочина MC, HSS, HSM

4. Сравнение на резултатите

Резултатите от четирите решения са обобщени в една графика, показана на фиг. 11. На табл. 2 са представени в числен вид деформациите в характерни точки от решението за слягане по МКЕ и МПС.

Таблица 2. Таблично представяне на резултатите

№ точка	X	Y	u_{y_HSS}	u_{y_HSM}	u_{y_MC}	$u_{y_МПС}$
-	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0	-2.00	-0.0085527	-0.025603	-0.014474	-0.0345
2	0	-4.00	-0.0004644	-0.005975	-0.006251	-0.0222
3	0	-6.00	-0.0001446	-0.0010328	-0.003485	-0.0137
4	0	-8.00	-0.0000512	-0.0004171	-0.001517	-0.00778
5	0	-10.00	0.0000000	0.0000000	-6.96E ⁻⁷	-0.00340



Фиг. 11. Сравнение на резултатите

Най-голямо слягане показва решението по метода на послойното сумиране (МПС). Това е така, тъй като при него има редица опростяващи фактори, не се взема предвид уякчаването на почвата както и се пренебрегва първичната коравина при много малките деформации. Решението на Mohr-Coulomb показва по-малки деформации, но не с достатъчна точност, тъй като в основата му стои линейно-еластичното поведение на почвата, което не отчита двойното уякчаване и изменението на якостта в диапазона на малките и много малките деформации. Hardening soil model (HSM) показва сравнително по-малко слягане. Най-малко слягане предвижда HSS моделът, защото той отчита якостта при малки деформации. Тази характеристика на модела го прави способен, „сам“ да определи активната зона на слягане.

5. Заключение

Съществува голям набор от конститутивни модели, които показват различно деформационно поведение, предвид определени геоложки фактори. След проведеното изследване се установява, че Hardening soil model с отчитане на якостта при малки деформации показва най-коректни слягания. Препоръчително е да се работи с него при изчисляване на деформациите под конструкциите, тъй като това определя до голяма сте-

пен усилията в тях. Методът на послойното сумиране до известна степен обяснява случващото се в почвената среда под фундамента, но не показва близки до реалността деформации. В зависимост от вида почва и нейните показатели, Hardening soil model би бил значително по-подходящ, макар и да отстъпва по възможности на HSS модела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rafat, F. Obrzud, A. Truty. (2018) The hardenind soil model – A practical guidebook.
2. Танев, Т. (2015) Моделиране на почви с отчитане на изотропно деформационно уякчаване. Дисертационен труд за присъждане на ОНС „Доктор“, УАСГ.
3. Керенчев, Н. (2015) Инерционна устойчивост и деформации на откоси при сезимично въздействие. Дисертационен труд за присъждане на ОНС „Доктор“, УАСГ.
4. PLAXIS 2D (2018) Material Model Manual.
5. Наредба № 1 от 10 септември 1996 г. За проектиране на плоско фундиране.
6. Керенчев, Н. (2014) Деформационни характеристики на глини от софийското поле, определени чрез изпитване с резонантна колона. XIV Международна научна конференция ВСУ'2014.
7. Kerenchev, N, I. Markov. (2016) Determining the axial bearing capacity of pile based on common methods and comparison with pile load, Proceedings of the 3rd International conference vietgeo 2016, 22-23 November 2016.
8. Mihova, L., Tanev, T. (2015) Elastic and elasto-plastic constitutive models in soil mechanics. Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Fascicule IV, Vol. XLVII, Sofia.

COMPARISON OF THE DEFORMATIONS UNDER A STRIP FOUNDATION WITH APPLYING DIFFERENT CONSTITUTIVE MODELS

К. Ilieva¹

Keywords: *double hardening models, small strain stiffness, strip foundation, settlement*

ABSTRACT

There are many constitutive models whose use in computational models results in various deformations. This is because the models represent different geological factors. The aim of this research is to make a comparison between four different methods. That will help to estimate more accurately the data when calculating a geotechnical structures and making a geotechnical analysis. In this case a comparison between the deformations under a strip foundation using basic geometrical and soil parameters is made.

¹ Kristina Ilieva, student, UACEG, No 16164, e-mail: krisi09612@gmail.com