



Получена: 07.04.2017 г.

Приета: 08.05.2017 г.

ВЛИЯНИЕ НА НАЧАЛНИЯ ХИДРАВЛИЧЕН ГРАДИЕНТ ВЪРХУ КОНСОЛИДАЦИЯТА НА НЕПРОПУСКЛИВИ СТРОИТЕЛНИ ПОЧВИ

А. Божинова-Хаапанен¹, Вл. Костов²

Ключови думи: геотехника, геология, консолидация, филтрация, градиент, напор, почви

РЕЗЮМЕ

В статията е разгледано влиянието на началния хидравличен градиент върху консолидацията на непроницаеви глинести строителни почви. За пример са взети прахови глини с плиоценска възраст от територията на гр. София. Определено е слягането на пласт, равномерно натоварен с напрежение 20 kPa, при различен процент консолидация с отчитане и без отчитане на $I_{нач.}$. Доказано е значението на началния хидравличен градиент при правилното определяне на слягането на земята основа на сгради и съоръжения.

1. Въведение

Теорията на консолидацията е разработена от Karl Terzaghi [4]. С течение на времето много от приетите изходни положения и постановки в тази теория са претърпели значителни промени. Вече се отчитат началните стойности на порния натиск, влиянието на структурната якост на почвата, наличието на газообразен флуид и много други.

¹ Ася Божинова-Хаапанен, доц. д-р инж. геол., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: assia_bo2002@yahoo.com

² Владимир Костов, проф. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vladimir.kostov@vizi-engineering.com

През 1950 г. Роза [1] внася ново за това време понятие в теорията на консолидацията, което засяга предимно филтрацията на водата от порите. Това е така нареченият „начален градиент“, т.е. необходимата минимална стойност на градиента на водата, за да се осъществява филтрацията от порите на почвата. Оказва се, че началният градиент оказва значително влияние на степента на консолидация на почвите, с което могат да се внасят корекции в методите за определяне на слягането и устойчивостта на земната основа на сградите и съоръженията. С влиянието на началния градиент могат да се обяснят в голяма степен и наблюдаваните слягания, които в глинести почви са значително по-малки в сравнение с изчислените. Началният градиент е причина за капсулиране на порния натиск в порите на почвите, което пречи на тяхната пълна консолидация. При наличие на порен натиск и якостта на почвите е по-малка съгласно уравнението на Terzaghi

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c . \quad (1)$$

В строителната практика до сега не се взема под внимание началният градиент и има само откъслечни данни за неговото влияние при проектиране на отделни обекти [2]. Определянето на този параметър не е регламентирано и в съществуващите стандарти – Национални стандарти за изпитване на строителните почви, DIN, както и в ЕВРОКОД 7.

Определянето на началния градиент на филтрация за слабо пропускливи и непроницаеми почви ще внесе модернизация в проектирането на почвите и изчисляването на земната основа на сградите и съоръженията по по-надежден и модерен метод.

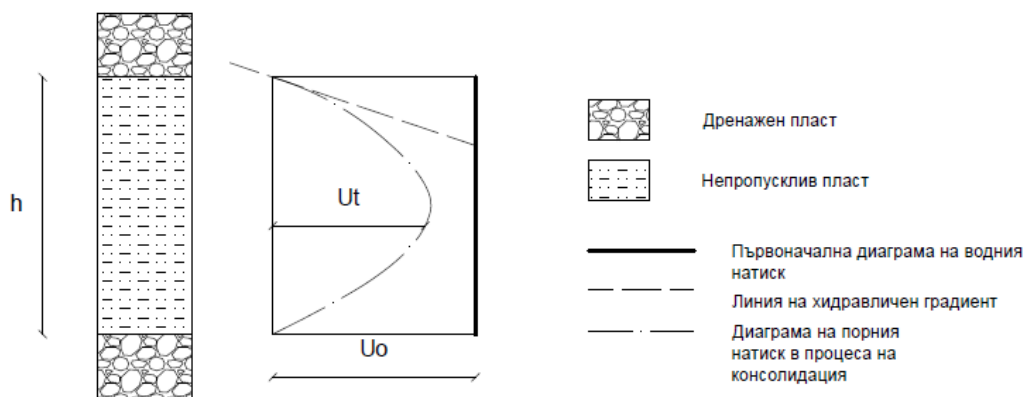
2. Теоретична част

Деформациите и устойчивостта на почвите с по-ниски коефициенти на филтрация и висока степен на водонасищане се диктува в значителна степен от така наречената филтрационна консолидация. Това е процес на уплътняване на почвите от земната основа при действието на допълнителни натоварвания от сгради и съоръжения, при което почвите намаляват своя обем. Намаляването на обема става за сметка на намаляването на обема на порите, което от своя страна е съпроводено с изтласкване на вода от самите пори.

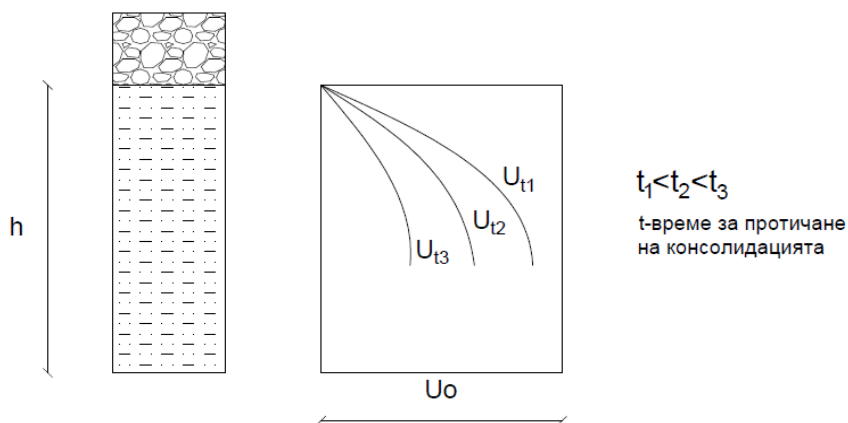
Изтласкването на водата от порите зависи най-вече от коефициентите на филтрация на почвените разновидности, от дебелината на почвения пласт и от условията за дрениране. За изтласкването на флуида от порите на границата с дренажния пласт е необходим хидравличен градиент. Този процес е онагледен от фиг. 1, където е дадена линията на напора (порния натиск) в деформируемия пласт и на неговата дренажна граница. Хидравличният градиент е отношението на напора на границата на дренажа към пътя на филтриращата вода. В случая това е тангенсът на ъгъла на линията на напора към вертикалата. В процеса на консолидацията този ъгъл е променлив.

Ако се приеме постановката на Terzaghi, ъгълът се изменя от $90 - \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} (90) \rightarrow \infty$ – само в теоретичен първи миг. Непосредствено след това, порният натиск става нула, а в дебелината на пласта се оформя линия на напора, която е променлива във времето на консолидацията.

На границата с дренажния пласт, който може да бъде или от едната, или от двете страни на деформируемия пласт, се оформя градиент, който също е променлив в периода на консолидацията – фиг. 2. Съгласно теорията на Terzaghi, която е послужила за основа на консолидационните процеси в почвата, в края на консолидацията градиентът на границата с дренажния пласт става нула.



Фиг. 1. Диаграма на порен натиск и начален хидравличен градиент при наличие на два дениращи пласта

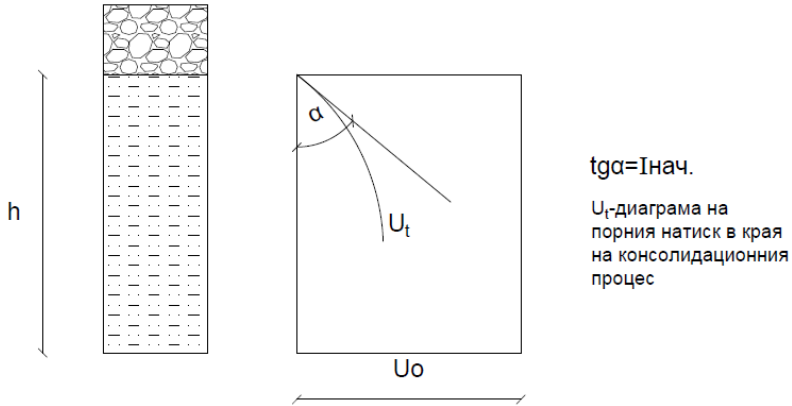


Фиг. 2. Изменение на диаграмата на порния натиск в процеса на консолидация

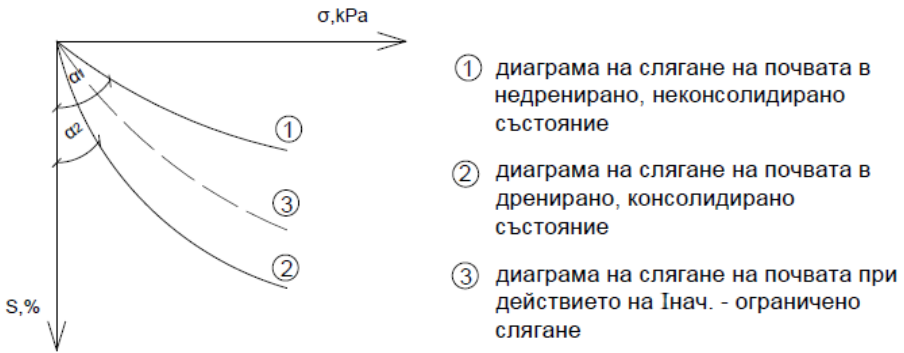
Съгласно изследванията – Роза [1] – в глинестите почви съществува така нареченият „начален градиент – $I_{нач}$ “, който ограничава възможностите за филтрация на границата в дренажния пласт. Според него филтрацията от глинестите пластове е възможна само когато градиентът на напора на изтласквания флуид – I надвишава началния градиент – $I_{нач}$. Това ограничава консолидацията до определена степен, тъй като на практика линията на напора в глинестия пласт на границата с дениращите пластове тангира линията на хидравличния градиент (фиг. 3).

Ефектът от влиянието на началния градиент се отразява в две посоки: запазва по-ниската деформируемост на почвата и намалява устойчивостта на земната основа чрез намаляване на якостта на сръзване на почвата.

Това влияние може да се демонстрира чрез сравнение на кривите на слягане на почвена проба при денирано и неденирано изпитване на компресия – фиг. 4.



Фиг. 3. Гранична стойност на порния натиск вследствие на началния хидравлически градиент



Фиг. 4. Криви на слягане при различни етапи на консолидация на почвата

Крива 1 е получена при недренирано, неконсолидирано изпитване. Наклоните на тангентите при точки, определени от натоварването – p , определят деформационните модули на почвите. Крива 2 е получена за същата почва, но при дренирано консолидирано изпитване, при което се приема, че порният натиск е нула. Деформационните модули се определят по аналогичен начин. Долната крива (2) е по-стръмна, което показва, че деформационните модули на почвите при недренирано състояние са значително по-високи в сравнение с деформационните модули, получени след консолидация на почвата и нулев порен натиск. Сравнението показва, че в периода на консолидацията горната крива (1) се доближава към долната (2). Следователно в периода на консолидацията сляганята нарастват и това нарастване се диктува от възможностите за дрениране и намаляване на порния натиск.

Ако по някакви причини дренирането и съответно намаляването на порния натиск е пречатвано, слягането спира на определен етап. Т.е. то не може да достигне размера, определен чрез използване на данните от дренирани консолидирани изпитвания за пълна консолидация. В този смисъл, началният градиент ограничава филтрацията на водата до определена степен (линия 3 показва влиянието на началния градиент върху деформационните модули). Началният хидравлически градиент води до по-малките по размер сляганя на строителните конструкции, което има благоприятен ефект върху тях.

Линията на напора (порен натиск) при линейна задача и ос z – насочена надолу – се определя от диференциалното уравнение на Terzaghi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (2)$$

където u е порен натиск;

t – време за консолидация на почвите;

z – дълбочина на точката, в която се определя порният натиск;

c_v – коефициент на консолидация:

$$c_v = \frac{kE}{\gamma_w}, \quad (3)$$

където k е коефициент на филтрация;

E – деформационен модул на почвата;

γ_w – обемно тегло на водата.

Диференциалното уравнение на консолидацията се решава чрез редове на Фурие и при двустранна филтрация на водата от пласт (дрениране и в горния и в долния край) [3] има вида:

$$u = \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{2u_0}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T}, \quad (4)$$

където

$$M = \frac{1}{2} \pi(2m+1), \quad (5)$$

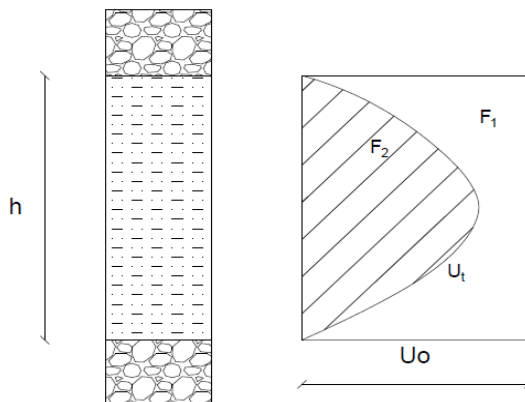
където m е номер на члена в реда на Фурие;

u_0 – начална стойност на порния натиск;

H – мощност на пласта, който консолидира;

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \text{ – наречен „фактор време“,} \quad (6)$$

в който t е времето, за което се определя консолидацията на почвата (разсейване на порния натиск).



Фиг. 5. Площи на ефективните напрежения и на порния натиск при незавършена консолидация на почвата

В графичен вид криви на напора (порен натиск) в дебелината на пласта са дадени на фиг. 5.

Щрихованата част (фиг. 5) F_2 е площта, която се заема от порния натиск (неконсолидирана част), а площта, която е светла, показва дренираната част от пласта (плоч на ефективните напрежения – F_1).

Отношението на дренираната част (светлата част от диаграмата) към цялата площ на диаграмата на напреженията се нарича степен на консолидация на пласта – U_z .

Съгласно теорията на Terzaghi, U_z се изменя от нула – в началото на консолидацията, до единица – в края на консолидацията. На практика, главно поради влиянието на началния градиент, степента на консолидация никога не може да стане 1 и достига до стойности, аргументирани от градиента.

Степента на консолидация може да се получи, като се обработи формулата за порния натиск, който се интегрира в рамките на пласта:

$$U_z = 1 - \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{2}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T}. \quad (7)$$

Слягането на пласта при незавършена консолидация се получава по формулата

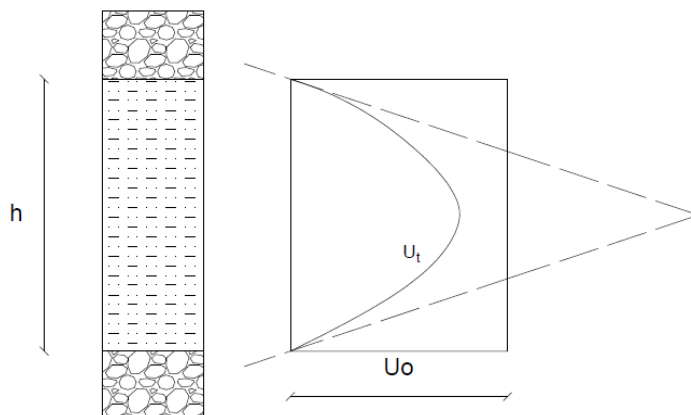
$$s = \frac{F_1}{E}, \quad (8)$$

където F е площ на ефективните напрежения,
 E – деформационен модул на почвата.

Слягането при незавършена консолидация може да се определи и като се намери слягането от пълните напрежения с използване на диаграмата на напреженията (F_1+F_2) и определената стойност да се умножи на степента на консолидация – U_z .

$$s = U_z \frac{F_1 + F_2}{E}. \quad (9)$$

На практика, след определяне на началния градиент на почвата, той се нанася като ъгъл на границата на пласта в равнината на дренажа – фиг. 3.

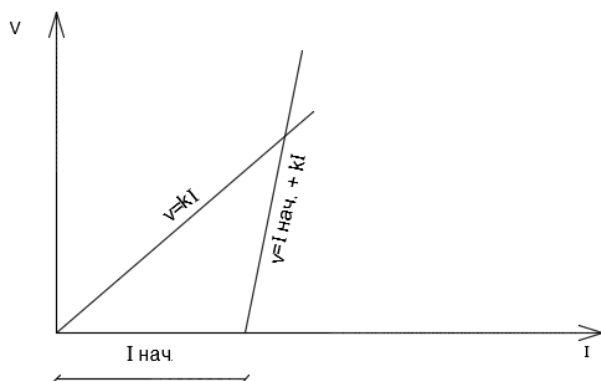


Фиг. 6. Опростено решение за определяне на слягането по Роза

Линията на порния натиск тангира на линията, която сключва началният градиент с вертикалата. Като се начертае съответната линия на порния натиск, се получава площта на ефективните напрежения. Тази площ са разделя на деформационния модул на почвата, с което се получава и съответната стойност на слягане на съоръжението. Стойността на така определеното слягане може да бъде значително по-малка от изчислената стойност, определена без отчитането на началния градиент.

При опростени решения на Роза [1] началният градиент се нанася като права, която ограничава дренирания пласт, с което се получава и слягането на пласта – фиг. 6.

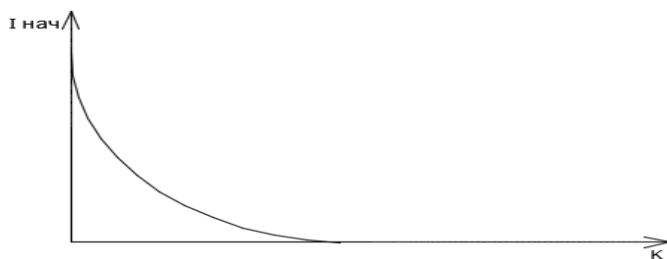
Съгласно закона на Дарси за ламинарно движение на подземните води $v = kI$, линията $v = f(I)$ преминава през началото на координатната система (фиг. 7, линия 1).



Фиг. 7. Зависимост между скорост на филтрация v и хидравлически градиент I

При слабо пропускливи и непрпускливи почви, поради наличие на начален градиент, зависимостта между градиента I и скоростта на филтрация на водата се дава от линия 2 (фиг. 7). В действащите стандарти няма начин да се определи началният градиент, докато за коефициентите на филтрация има натрупан богат опит – значителна банка с данни. В този смисъл има значение връзката между коефициентите на филтрация и началния градиент. Качествено се приема, че при силно пропускливите почви няма период на консолидация и изтласкването на водата става в такт със самото строителство, т.е. липсва консолидационен процес. С основание може да се приеме, че за тези случаи началният градиент е нула. При водоплътните почви на същото основание може да се приеме, че началният градиент е голям.

По посочените съображения, линията на зависимостта коефициент на филтрация – начален градиент тангира в двете оси на координатна система коефициент на филтрация – начален градиент. От условията за тангиране следва, че линията е вдлъбната от вида, показан на фиг. 8.



Фиг. 8. Теоретична зависимост между начален хидравлически градиент и коефициент на филтрация

$$I_{\text{нач}} = \frac{a}{k^n}, \quad (10)$$

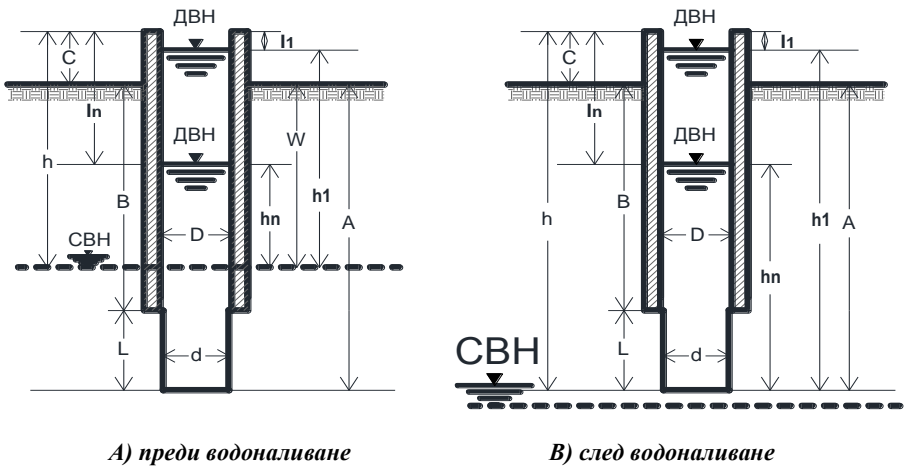
където $I_{\text{нач}}$ и k са съответно началният градиент и коефициентът на филтрация, а „ a “ и „ n “ са коефициенти, които следва да се определят експериментално.

3. Опитна постановка

За определяне на коефициентите на филтрация на строителните почви „in situ“ е избран методът на експресно водоналиване в сондажни изработки.

За целта е направен сондаж с дълбочина 30 m. За опитните водоналивания са избрани интервали в непропускливи или полупропускливи строителни почви.

Схемата на метода е дадена на фиг. 9.



Фиг. 9. Опитна постановка за определяне на коефициент на филтрация в сондаж

За изчисленията са използвани следните изходни данни:

- A – дълбочина на сондажа,
- B – дълбочина на обсаждане,
- L – дължина на необсадения интервал,
- C – височина на обсадната тръба над терена,
- d – вътрешен диаметър на обсадна тръба,
- D – диаметър на необсадената част от сондажа,
- W – статично водно ниво 10 мин преди опита (СВН),
- h – разстояние от горния ръб на обсадната колона до СВН.

Статично водно ниво след приключване на сондирането (СВН):

- t – време от началото на опита,
- l_n – дълбочина на динамично водно ниво (ДВН),
- h_n – превишение над СВН, $h_n = h - l_n$.

Коефициентите на филтрация са изчислени по формулите:

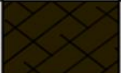





$$F = \frac{2 * \pi * L}{\log_e(2L/D)} \text{ при } F > 4D;$$

$A = \pi * (d/2)^2$ – при вертикален сондаж;

$$K = \frac{A}{F * (t_n - t_{n-1})} * \log_e (H_n / H_{n+1}) .$$

4. Анализ на получените резултати

Изпитвания за определяне на коефициентите на филтрация са правени на територията на гр. София, в районна на “Солни пазар“, в глинести прахови почви с плиоценски произход. Разположението на строителните почви в разрез е дадено на фиг. 10.

СОНДАЖНА КОЛОНКА								
Моторен сондаж № 1								
Плост №	Дълбочина, м	Дебелина, м	Условен знак	Литолошко описание	Геол. описание	ПВН	УВН	Забележки
①	2.40	2.40		Насип	Q			
②	5.60	3.20		Пясък, дребен до среден с прахова компонента	N ₂ (Pl)			
③	17.20	11.60		Глина, прахова или прахова пясъчлива – фина, сиво зелена	N ₂ (Pl)			
②	20.40	3.20		Пясък, дребен до среден с прахови частици	N ₂ (Pl)			
③	26.80	6.40		Глина, прахова или прахова пясъчлива – фина, сиво зелена	N ₂ (Pl)			
②	30.00	3.20		Пясък, дребен до среден с прахови частици	N ₂ (Pl)			

Фиг. 10. Сондажна колонка на МС 1

Коефициентите на порите, които имат пряко отношение към коефициентите на филтрация на почвите от опитните участъци, се изменят от 0,95 до 1,12.

След статистическа обработка на получените стойности за коефициентите на порите, се получиха: средна стойност (характеристична стойност) – $e = 0,955$. Средно квадратично отклонение $\sigma_x = 0,155$ и коефициент на вариация $v = 0,168$. Получената стойност за коефициента на вариация е по-ниска от 0,2, което дава основание при изчисленията да се работи с характеристичната стойност.

Получените коефициенти на филтрация за тази почвена разновидност варират около стойностите $6,5 \cdot 10^{-7}$ до $1,0 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Тези стойности се потвърждават и от други изпитвания. За метростанция 9 от трети метродиаметър – при паметника на Патриарх Евтимий, средната стойност на коефициента на филтрация за глините е $5 \cdot 10^{-7}$ cm/s, а при метростанция 8 – при Лъвов мост коефициентът на филтрация на глините е $2,8 \cdot 10^{-7}$ cm/s.

В района на гр. София, максималната стойност на дебелината на глинестите пластове е 8 m, а средната стойност на деформационните модули е 30000 kPa. Въз основа на получените данни се получава средна стойност на обемното тегло на почвите от пlicoенския комплекс $\gamma = 18,5$ kN/m³. При тези данни, като се приложи теорията за консолидацията на Terzaghi, се използват величините:

$$\text{Коефициент на консолидация} - c_v = \frac{kE}{\gamma_w} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^4}{10} = 3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Фактор време} - T = \frac{c_v t}{H^2} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot t}{4^2} = 1,87 \cdot 10^{-7} t.$$

Във формулата е приета двустранна филтрация и по тази причина, най-дългия път на филтриращата вода е $H = 4$ m, t е времето за консолидация в секунди.

Като се използват графиките на Terzaghi за степен на консолидация на целия пласт, се получава, че за 90% консолидация е необходим фактор време $T = 0,9$. По посочената по-горе формула се получава, че необходимото време за консолидация е 1336 часа или 56 денонощия.

На фиг. 11 са представени линии на напора в пласт с двустранна филтрация. При допълнително натоварване на пласта с равномерно напрежение от 20 kPa, слягането – s при 100% консолидация е:

$$s = \frac{p2H}{E} = \frac{20 \cdot 2 \cdot 4}{30000} = 0,00533 \text{ m} = 5,33 \text{ cm}.$$

При 90% консолидация, слягането ще бъде $5,33 \cdot 0,9 = 4,79$ cm.

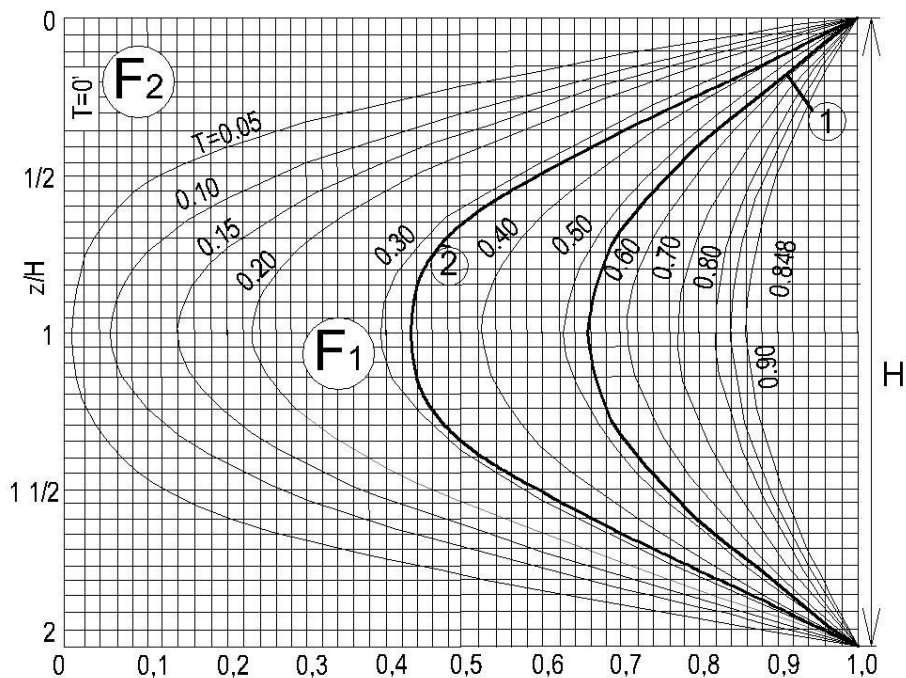
Ако приемем, че началният градиент е 0,8, означава, че наклонът на линията на напора на границата с дренажния пласт има ъгъл 38,65°. Тангента на линията на напора от 38,65° показва съответен фактор време

$$T = 0,6.$$

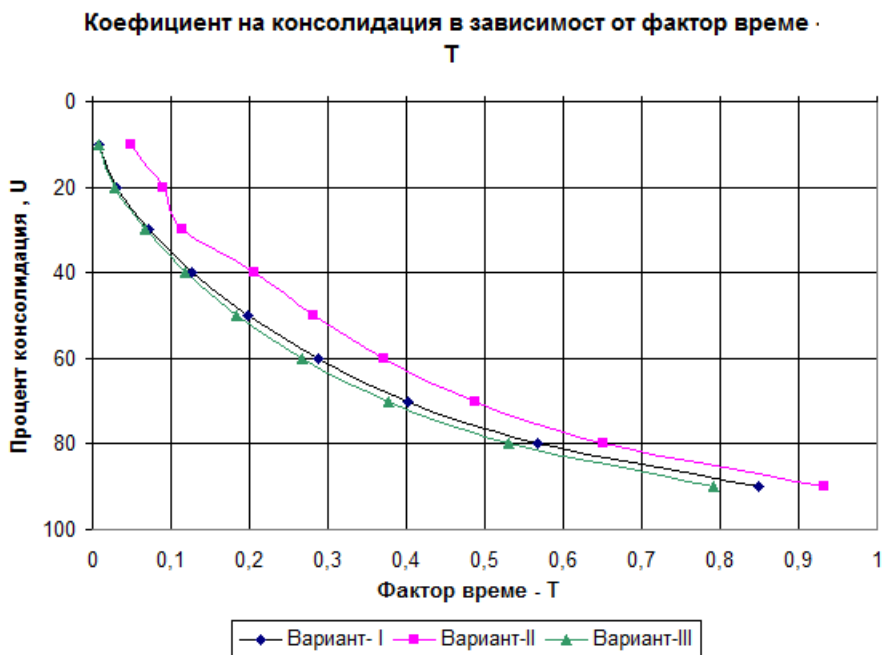
От фиг. 12, за фактор време 0,6 се отчита коефициент на консолидация 0,8. При този коефициент на консолидация се получава слягане:

$$s_{0,8} = 5,33 \cdot 0,8 = 4,26 \text{ cm},$$

което прави намаление на слягането с 1,07 cm или с 20% по-малко от изчислената стойност. Времето, за което следва да завърши консолидацията, вече е 891 часа, или 37 денонощия, което е с 19 денонощия по-малко.



Фиг. 11. Линии на напора (порен натиск) в зависимост от фактора време T



Фиг. 12. Коефициент на консолидация в зависимост от фактора време - T , [4]

Значително по-фрапиращи резултати ще се получат при стойности на началния градиент 2 и повече, както е установено за отделни случаи на плиоценските глини. По описания по-горе начин за този случай се получава фактор време $T = 0,35$, съответен коефициент на консолидация 0,65 и съответно слягане 3,46 cm. Времето за завършване на консолидацията при тези условия ще е 668 часа или 29 денонощия.

5. Заключение

Намирането на корелационни зависимости между почвените характеристики, влияещи върху процесите на консолидация, ще позволи индиректното определяне на началните градиенти на филтрация на непропускливи почви

От посочените примери се вижда голямото значение на началния градиент при определяне на размерите и сроковете на слягане на фундаментите на сградите и съоръженията – фактор, който до сега не е отчитан. Правилното определяне на този параметър ще даде възможност да се рационализира проектирането на земната основа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Роза, С. А.* Осадки гидрогехнических сооружений на глинах с малой влажностью. Гидротехническое строительство № 9, 1950.
2. *Bozhinov, B., S. Stefanov.* Festigkeits und verformungs kennwerte Boren in der Bucht von Burgas. В: VI Дунайская европейская конференция по механике грунтов, Варна, 1981.
3. *Taylor, D.* Fundamentals of Soil Mechanics. New-York – London, 1954.
4. *Terzaghi, K.* Erdbaumechanik. Wien, 1925.

EFFECT OF THE INITIAL HYDRAULIC GRADIENT ON THE CONSOLIDATION OF IMPERMEABLE CONSTRUCTION SOILS

A. Bozhinova-Haapanen¹, Vl. Kostov²

Keywords: *geotechnics, geology, consolidation, filtration, gradient, push*

ABSTRACT

This paper discusses the effect of the initial hydraulic gradient on the consolidation of impermeable clay construction soils. Pliocene silty clays from the Sofia area were taken to exemplify that effect. The settlement of a layer evenly loaded with a stress of 20 kPa for a different percentage of consolidation was determined taking or without taking into account I_{init} . The relevance of the initial hydraulic gradient for the correct calculation of the subsoil settlement effect on buildings and equipment has been proved.

¹ Assia Bozhinova-Haapanen, Assoc. Prof. Dr. Eng. Geol., Dept. “Geotechnical Engineering“, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: assia_bo2002@yahoo.com

² Vladimir Kostov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Geotechnical Engineering“, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vladimir.kostov@vizi-engineering.com