



УДК: 624.07

ВЫЧИСЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Сергей Анатольевич Тумаков

E-mail: tumakovsa@ystu.ru

Григорий Николаевич Голубь

E-mail: golubgn@ystu.ru

*Кафедра строительных конструкций, Ярославский
государственный технический университет, ул. Кривова, 40,
Ярославль, Российская Федерация, 150048*



Произведена оценка влияния неоднородности грунтового основания на напряженно-деформированное состояние железобетонного плитного фундамента и конструкций здания с учетом развития деформаций грунтового основания во времени. Неоднородность основания выражена различными фильтрационными свойствами грунтов, слагающих основание плитного фундамента. Под подошвой фундаментной плиты в толще водонасыщенных песков располагается линза глинистого грунта. Приводится сопоставление результатов расчета конструкций здания и фундаментной плиты здания, определенное для дискретных значений времени с результатами, полученными расчетом по стабилизированным деформациям. В расчетах применен условный модуль деформации грунта. Принимается, что в начальный момент времени приложения нагрузки условный модуль деформации грунта грунтового основания E_t стремится к бесконечности, а в конечный момент стабилизации деформаций – к фактическому размеру E . Условный модуль деформации вычисляется по приближенной зависимости, полученной из основного уравнения теории фильтрационной консолидации. Моделирование здания и численный расчет выполняется в программном комплексе SCAD.

Ключевые слова: грунтовое основание, фильтрационная консолидация, напряженно-деформированное состояние, программный комплекс SCAD.

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Вычисление напряжений в строительных конструкциях здания с учетом развития деформаций грунтового основания. Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. Вып. 1. С. 7-13 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N1_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_1_7



UDC: 624.07

CALCULATION OF STRESSES IN THE BUILDING STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT GROUND BASE DEFORMATIONS

S.A. Tumakov, G.N. Golub

Sergey A. Tumakov

E-mail: tumakovsa@ystu.ru

Grigory N. Golub

E-mail: golubgn@ystu.ru

*Department of Building structures, Yaroslavl State Technical University,
40, Krivova St., Yaroslavl, 150048, Russia*



The paper reflects the assessment of the effect the heterogeneity of the ground base has on the stress-strain state of the reinforced concrete slab foundation and the structure of the building. It takes into account the development of deformations of ground base in time. Different filtration properties of subfoundation show the heterogeneity of the slab foundations. There is a lens of loam soil in series of saturated sands under the foot portion of the base slab. The paper shows the comparison of calculation results for the building structure and the base slab within the discrete time with the results obtained by the calculation of the steady-state deformations. The calculations contain the conditional soil deformation modulus. It is assumed that, at the initial time of application of the load, the conditional deformation modulus of the ground base E_t tends to infinity, but at the final moment of deformation stabilization, it tends to the actual size E instead. The conditional deformation module is calculated using the approximate dependence obtained from the basic equation of the theory of soil filtration consolidation. SCAD software package serves for building modeling and numerical calculation

Key words: ground base, soil filtration consolidation, stress-strain state, SCAD software package.

For citation:

Tumakov S.A., Golub G. N. Calculation of stresses in the building structures, taking into account ground base deformations. Smart Composite in Construction. 2021. V. 2. No 1. P. 7-13 URL:

http://comincon.ru/index.php/tor/V2N1_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_1_7



ВВЕДЕНИЕ

Нормативные документы расчета и проектирования оснований, зданий и сооружений указывают на необходимость совместного расчета грунтовых оснований зданий и сооружений. Вместе с этим следует учитывать особенности свойств грунтовых оснований, сложенных медленно уплотняющимися грунтами, когда для оценки напряженно-деформированного состояния надфундаментных конструкций, с учетом длительных процессов развития деформаций основания, нужно проводить совместный расчет с учетом консолидации грунтов во времени.

Теория консолидации, прогнозирующая зависящую от времени деформацию грунтового основания, является одним из важнейших вопросов механики грунтов. Математическое моделирование фильтрационного процесса поровой воды из грунта берет начало с работы К. Терцаги [1], в которой он ввел понятие эффективных напряжений, предложил, по аналогии с уравнением теплопроводности, дифференциальное уравнение фильтрационной консолидации грунтов и решил одномерную задачу уплотнения водонасыщенного глинистого грунта в виде слоя конечной толщины. Дифференциальное уравнение одномерного уплотнения грунтовой массы по времени t и глубине z

$$c_v \frac{\partial^2 p_z}{\partial z^2} = \frac{\partial p_z}{\partial t}, \quad (1)$$

где c_v – коэффициент консолидации грунта; p_z – эффективное напряжение.

Дальнейшее развитие теория фильтрационной консолидации получила в трудах Н.М. Герсеванова [2], В.А. Флорина [3], Н.А. Цытовича [4]. М. Био дополнительно изучил взаимодействие между распределением избыточных давлений и деформацией скелета грунта и развил связанную теорию консолидации на случай трехмерных задач [5].

Исследование развития деформаций грунтовых оснований во времени продолжает оставаться актуальным и в настоящее время. Это продиктовано необходимостью получения более надежных конструктивных решений зданий за счет детального изучения и учета фильтрационных процессов в грунтах в различных грузовых состояниях основания, соразмерно со специфическими особенностями грунтовых массивов, аналитическими и численными методами [6-10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В рамках научно-исследовательской работы произведена оценка влияния неоднородности грунтового основания на напряженно-деформированное состояние железобетонного плитного фундамента и конструкций здания. Рассматривалось грунтовое напластование, неоднородность которого обуславливалась различными фильтрационными свойствами грунтов, слагающих основание плитного фундамента. Под подошвой фундаментной плиты на глубину 5 метров распространены водонасыщенные пески средней крупности с модулем деформации $E=20$ МПа и коэффициентом фильтрации $K_f=15$ м/сут, имеющие в своем составе линзу глинистого грунта с модулем деформации $E=10$ МПа

и коэффициентом фильтрации $K_f=0,1$ м/сут. Ниже, до глубины сжатой толщи, находятся пески мелкие с модулем деформации $E=30$ МПа. В качестве объекта исследования выбран проект: прототип кирпичного девятиэтажного здания Г-образной формы с габаритами в плане в осях $22,01 \cdot 18,71$ м в г. Ярославле.

При строительстве зданий на неоднородных основаниях возможны различные конструктивные решения, позволяющие, тем или иным образом, уменьшить или исключить неравномерные деформации оснований, вызванные неоднородными деформационными свойствами грунтов или разными скоростями приобретения этих деформаций под действующими нагрузками. В проведенной работе рассматривался только один вариант, здание с фундаментом в виде сплошной плиты толщиной 0,6 м, опертой на неоднородное основание. Задачей исследования было оценить изменение напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты и надфундаментных конструкций с течением времени в зависимости от скорости затухания деформаций грунтов под различными участками фундамента, обусловленных неоднородными фильтрационными свойствами грунтов, учесть это при расчете тела плиты и надфундаментных конструкций, повысить надежность отдельных конструкций и надежность здания в целом.

Для прогнозирования поведения грунтовых массивов под нагрузкой в большинстве случаев в инженерной практике используются методы, основанные на упрощающих предположениях. В данной работе дополнительно к общепринятым допущениям, принятым в расчетах фильтрационной консолидации, таким как пренебрежение сжимаемостью под нагрузкой поровой жидкости и зерен скелета полупространства, допущением об отсутствии зависимости суммарных напряжений от времени, сделаны следующие допущения. Деформационные показатели, модуль деформации и коэффициент относительной сжимаемости, грунта не зависят от размера напряжений. При определении размера деформации с течением времени во время строительства, деформация вычисляется для дискретных параметров времени, выбранных с определенным интервалом, от дискретных размеров нагрузки, вычисленных на данный момент возведения здания в соответствие с разработанным календарным планом.

Следующее допущение сделано в отношении коэффициентов постели модели грунтового основания П.Л. Пастернака [11]. Принимаем, что в расчетной момент времени $t=0$ деформация грунтового основания в рассматриваемой точке равна нулю и равна размеру конечной стабилизированной деформации в момент времени $t=t_{стаб}$. Для дальнейших расчетов вводим условный модуль деформации грунта, как функцию времени E_t . Допускаем, что в начальный момент времени приложения нагрузки условный модуль деформации грунта грунтового основания E_t стремится к бесконечности, а в конечный момент стабилизации деформаций – к фактическому размеру E , определенному инженерно-геологическими изысканиями. Очевидно, что для грунтов, имеющих различные фильтрационные свойства, время стабилизации деформаций будет различно. Для каждого грунта условный модуль деформации находим по аналогии с известной формулой развития деформаций грунта во времени [4]



$$S_t = S_{\text{стаб}} \cdot \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \left(e^{-N} + \frac{1}{9} \cdot e^{-9N} + \frac{1}{25} \cdot e^{-25N} + \dots \right) \right], \quad (2)$$

где S_t – размер деформации основания в произвольный момент времени t ;

$S_{\text{стаб}}$ – размер конечной стабилизированной деформации слоя расчетной толщины h ;

$$N = \frac{\pi^2 c_v}{4h^2} t. \quad (3)$$

Поскольку деформации грунтов являются обратной зависимостью от модуля деформации, принимаем в расчетах приближенную величину условного модуля деформации грунта, определяемую для произвольного момента времени по формуле

$$E_t = \frac{E}{\left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \left(e^{-N} + \frac{1}{9} \cdot e^{-9N} + \frac{1}{25} \cdot e^{-25N} + \dots \right) \right]}. \quad (4)$$

Моделирование и расчет несущих конструкций здания с учетом сроков его возведения, а также с учетом развития деформаций по времени, произведено в программном комплексе SCAD++ Office (Сервисный контракт 800908099). При описании характеристик грунтового основания для дискретных значений времени, соответствующих различным этапам возведения здания, вводились размеры модуля деформации, определенные по формуле (4). Таким образом, коэффициенты постели модели Пастернака получали зависимость от времени [12]

$$C_1 = \frac{E_t}{h(1-\nu^2)}; C_2 = \frac{E_t \cdot h}{6(1-\nu)}. \quad (5)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных расчетов и последующего их анализа установлено, что напряженно-деформированное состояние несущих конструкций здания [13] и фундаментной плиты, определенное для дискретных значений времени, отличается от вычислений, полученных для стабилизировавшегося состояния, которое для рассматриваемого варианта грунтовых условий наступает через 40 лет. Анализ полученных напряжений показал, что при учете фильтрационной консолидации в процессе возведения здания в зоне расположения линзы водонасыщенной глины в начальный момент строительства значительно повышаются значения отпора грунта R_z , по сравнению с расчетом по конечным осадкам, что сказывается на напряженно-деформированном состоянии как фундаментной плиты, так и конструкций здания. Это необходимо учитывать при разработке конструктивных решений здания, обеспечивающих требуемые их прочность и устойчивость к неравномерным деформациям. В результате работы установлено, что армирование фундаментной плиты при расчете с учетом развития деформаций грунтов во времени количественно отличается от армирования, полученного в расчете по конечным деформациям. Если по расчету по конечным осадкам максимальная площадь верхней рабочей арматуры на один метр по оси X составлял $49,1 \text{ см}^2$, то с учетом развития деформаций основания во времени она составила 76 см^2 . Аналогично изменились площади остальной рабочей арматуры. Таким

образом, установлено, что учет развития деформаций грунтовых оснований в конструктивных расчетах повысит надежность проектируемых зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Терцаги К.** Строительная механика грунта. М.: Госстройиздат, 1933. 392 с.
2. **Герсеванов Н.М.** Основы динамики грунтовой массы. М.: Госстройиздат, 1933. 196 с.
3. **Флорин В.А.** Теория уплотнения земляных масс. М.: Госстройиздат, 1948. 284 с.
4. **Цытович Н.А.** Механика грунтов. М.: Госстройиздат, 1940. 390 с.
5. **Biot M.A.** General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*. 1941. V. 12. N 2. P. 155–164.
6. **Ерченко Д.Е., Федоренко Е.В.** Верификация расчетов фильтрационной консолидации в геотехнических программах. *Дороги и мосты*. 2017. № 2(38). С. 207–217.
7. **Костерин А.В., Скворцов Э.В.** Фильтрационная консолидация упругого полупространства под осесимметричной нагрузкой. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2014. № 5. С. 74–80.
8. **Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Нгуен Хуи Хиен.** Консолидация и ползучесть оснований фундаментов конечной ширины. *Вестник МГСУ*. 2013. № 4. С. 38–52.
9. **L. Ho, Fatahi B., Khabbaz H.** Analytical solution for one-dimensional consolidation of unsaturated soils using eigenfunction expansion method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. V. 38. N 10. P. 1058–1077.
10. **Huang J., Griffiths D.V., Fenton G.A.** Probabilistic analysis of coupled soil consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. V. 136. N 3. P. 417–430.
11. **Пастернак П.Л.** Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат, 1954. 56 с.
12. **Кюккер А.Е., Грибков А.А., Тумаков С.А.** К вопросу учета развития осадок фундаментов во времени при выполнении численных расчетов надфундаментных конструкций. Шестидесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 20 апреля 2016 г. Ярославль. Сб. материалов конф. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2016. С. 1139–1142.
13. **Balushkin A.L.** Assessment of the bearing capacity of elements of reinforced concrete floors with regard to adaptation to special effects. *Smart composite in construction*. 2020. V. 1. N 1. P. 36–38. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020.

Поступила в редакцию 16.11.2020



Принята к опубликованию 15.02.2021

REFERENCES

1. **Terzaghi K.** *Construction soil mechanics*. M.: Gosstroyizdat. 1933. 392 p. (in Russian).
2. **Gersevanov N.M.** *Basics of soil mass dynamics*. M.: Gosstroyizdat. 1933. 196 p. (in Russian).
3. **Florin V.A.** *Theory of Soil Consolidation*. M.: Gosstroyizdat. 1948. 284 p. (in Russian).
4. **Citovich N.A.** *Mechanics of soils*. M.: Gosstroyizdat. 1940. 390 p. (in Russian).
5. **Biot M.A.** *General theory of three-dimensional consolidation*. *Journal of Applied Physics*. 1941. V. 12. N 2. P. 155–164.
6. **Fedorenko E.V., Erchenko D.E.** *Solving the consolidation task by various methods*. *Roads and bridges*. 2017. N 2(38). P. 207-217. (in Russian).
7. **Kosterin A.V., Skvortsov E.V.** *Filtration consolidation of elastic half-space under axisymmetric load*. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 2013. N 4. P. 38-52. (in Russian).
8. **Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Nguyen Huy Hiep.** *Consolidation and creep of subfoundations having finite widths*. *Vestnik MGSU*. 2013. N 4. P. 38-52 (in Russian).
9. **L. Ho, Fatahi B., Khabbaz H.** *Analytical solution for one-dimensional consolidation of unsaturated soils using eigenfunction expansion method*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. V. 38. N 10. P. 1058–1077.
10. **Huang J., Griffiths D.V., Fenton G.A.** *Probabilistic analysis of coupled soil consolidation*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. V. 136. N 3. P. 417–430.
11. **Pasternak P.L.** *On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants*. M.: Gosstroyizdat. 1954. 56 p. (in Russian).
12. **Kyukker A.E., Gribkov A.A., Tumakov S.A.** *On the issue of accounting for the development of sediments of foundations over time when performing numerical calculations of above-foundation structures*. *The sixty-ninth scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students of higher educational institutions with international participation*. 20 April 2016. Yaroslavl. Sat. materials conf. Yaroslavl: Published. house of YSTU. 2016. P. 1139-1142. (in Russian).
13. **Balushkin A.L.** *Assessment of the bearing capacity of elements of reinforced concrete floors with regard to adaptation to special effects*. *Smart composite in construction*. 2020. V. 1. N 1. P. 36-38. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020.

Received 16.11.2020

Accepted 15.02.2021