

УДК 539.3, 539.4

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТНОЇ ПЛИТИ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

С.О. Пискунов¹,
д-р техн. наук, професор

Аль-Хуссейн К.¹

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

В статті представлені результати визначення напружено-деформованого стану фундаментної плити на пальовій основі із використанням напіваналітичного метода скінчених елементів (НМСЕ). Проведено порівняння результатів, отриманих для випадку однорідного та неоднорідного ґрунтового масиву та в двовірній та просторовій постановках.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінчених елементів (НМСЕ), фундаментна плита, неоднорідний ґрунтовий масив, напружено-деформований стан, пружне деформування.

Вступ. Фундамент є однією з найбільш важливих та відповідальних складових конструкції будівель і споруд. Помилки, допущені при проектуванні та закладенні фундаментів, завдають великої руйнівної шкоди будівлі і тим самим ускладнюють її експлуатацію. Навіть різні методи підсилення фундаменту не дають гарантії його подальшої безпечної роботи, а можуть лише на якомусь етапі призупинити процес руйнування. Тому визначення напружено-деформованого стану фундаментів потребує особливої ретельності і уваги.

Однією із проблем, які мають місце при проектуванні фундаментів є коректне урахування фізико-механічних властивостей ґрунтового масиву, що оточує фундамент, зокрема відмінностей властивостей шарів ґрунту, які залягають на різних глибинах.

Загальний підхід до вирішення цієї проблеми можливий тільки на основі чисельних методів, найбільше розповсюдження серед яких при розв'язанні задач механіки деформівного твердого тіла здобув метод скінчених елементів (МСЕ).

Постановка задачі і методика дослідження. Метою даної роботи є дослідження впливу урахування неоднорідності ґрунтового масиву, що оточує фундамент на пальовій основі, та виявлення відмінностей результатів розрахунку в двовірній (в межах плоскої задачі) та просторовій постановках.

Розрахункова модель фундаментної плити розмірами 30×20 м з палями перерізом 400×400 мм, які розміщені з кроком 3 м, представлена у вигляді відносно жорсткого (порівняно із оточуючим ґрунтом) тіла, рис. 1. Цей об'єкт може бути поданий як просторове призматичне тіло, отримане рухом геометричної фігури, контур якої відповідає поперечному перетину плити і фрагмента ґрунту, вздовж прямолінійної утворюючої (рис. 1). Зважаючи на ці особливості форми досліджуваного об'єкту побудову відповідних дискретних моделей доцільно проводити на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ). Це передбачає застосування одного скінченного елемента для апроксимації об'єкту вздовж характерної координати (утворюючої) в сполученні із розкладом шуканих і заданих параметрів за цим напрямком в ряд за системою безперервних ортогональних гладких базисних функцій Використання НМСЕ дозволяє суттєво скоротити кількість невідомих при

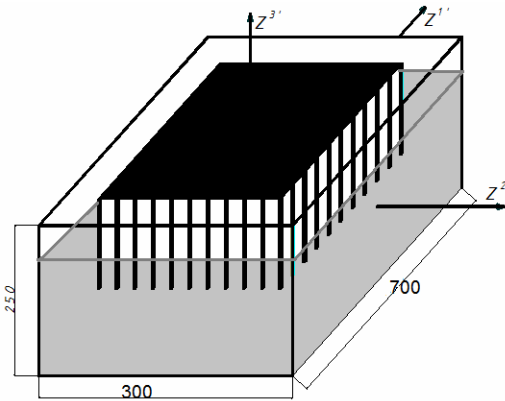


Рис.1. Розрахункова схема фундаментної плити з палями та фрагментом двошарового ґрунту

розв'язанні просторових задач, не зменшуючи точності отримуваного розв'язку, особливо у випадках розгляду об'єктів із змінними вздовж утворюючої фізико-механічними характеристиками [2, 3, 4 та ін.].

Для побудови дискретної моделі у даній роботі використаний неоднорідний призматичний скінчений елемент (СЕ), який моделює поєднання

різних матеріалів шляхом змінення модуля пружності уздовж твірної. Розрахункові співвідношення СЕ базуються на використанні рівнянь просторової задачі теорії пружності.

Розподіл переміщень в межах поперечного перерізу СЕ описується лінійним законом:

$$u_{m'} = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} u_{m'}(S_1, S_2) \left(\frac{1}{2} S_1 x^1 + \frac{1}{2} S_2 x^2 + S_1 S_2 x^1 x^2 + \frac{1}{4} \right). \quad (1)$$

У напрямку твірної переміщення апроксимуються розкладанням по системі координатних функцій - поліноми Лагранжа і Міхліна.

$$u_{m'} = \sum_{l=0}^L \bar{u}_{m'}^l \varphi^{(l)}. \quad (2)$$

Відповідні розв'язувальні співвідношення для неоднорідного призматичного скінченного елемента наведені в [2, 3].

Дослідження впливу урахування неоднорідного ґрунтового масиву на напружений стан фундаменту. Як було зазначено вище, з метою об'єктивної оцінки несучої здатності плити необхідним є проведення аналізу її напружено-деформованого стану в просторовій постановці з урахуванням неоднорідності фізико-механічних властивостей шарів ґрунту. Для вирішення поставленого питання була розглянута четверта частина конструкції фундаменту. Площини $z^1=0$ та $z^2=0$ є площинами симетрії, вздовж яких встановлені відповідні граничні умови. Для дослідження відмінностей розподілення напружень з однорідним і неоднорідним ґрунтом розглянуто фрагмент фундамента в однорідному і двошаровому ґрунтовому масиві.

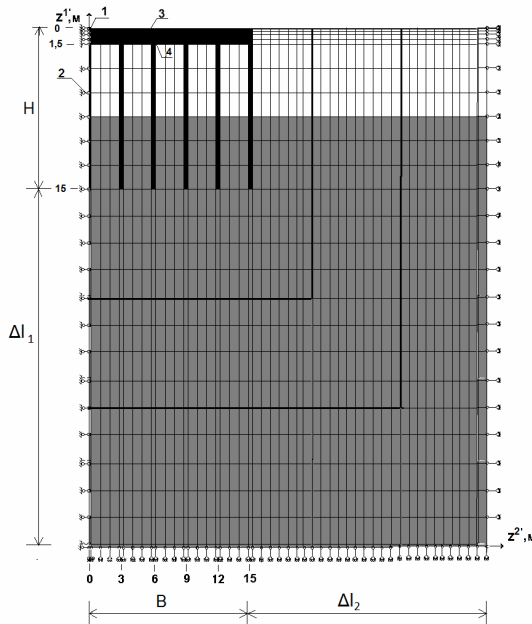


Рис. 2. Загальний вигляд дискретної моделі МСЕ

На першому етапі розрахунок проведено в двовимірній постановці із використанням МСЕ. При цьому розглянуто фрагмент фундамента з

одним рядом паль. Дискретна модель являє собою фрагмент плити з палями із оточуючим фрагментом ґрунтового масиву розміром Δl_1 і Δl_2 в напрямках z^1 і z^2 відповідно. Для визначення збіжності результатів в залежності від розмірів розглядуваного фрагменту ґрунтового масиву отримано серію розв'язків при $\Delta l_1 = 10, 20$ або 30 м і $\Delta l_2 = 6, 16$ або 26 м (рис. 2).

Зважаючи, що точність обчислення напружень ґрунтується на співвідношеннях для деформацій, які в свою чергу визначаються різницями величин переміщень, для аналізу збіжності розглянуто залежність різниць переміщень в точках 1 і 2 та 3 і 4, отриманих при різних розмірах Δl_2 (рис. 3).

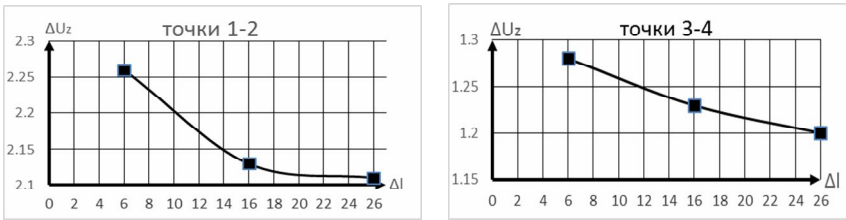


Рис. 3. Зміння різниць переміщень при збільшенні розміру оточуючого фрагменту ґрунта

Як видно при збільшенні характерних розмірів фрагмента ґрунту за межами фундаменту понад 10 м різниця переміщень в характерних точках фундаменту стабілізується. Таким чином розмір розглядуваного фрагмента в площині $z^1 - z^2$ дорівнює 31×35 м.

Для дослідження відмінностей розподілення напружень з однорідним і неоднорідним ґрунтом розглянуто фрагмент фундамента в однорідному і двошаровому ґрунтовому масиві (рис. 4). Отримані результати розрахунку подані у вигляді графіків згинальних напружень ($\sigma_{2,2}$) вздовж ряду паль по верхній та нижній (переріз 1-1 і 2-2 відповідно, рис. 6) поверхнях фундаментної плити. Вибір перерізів обумовлений тим, що саме в них величини напружень досягають своїх максимальних значень, визначення яких викликає найбільше зацікавлення, і які дають найбільш точну оцінку результатів. З графіків розподілу згинальних напружень, зображених на рис. 6 видно, що урахування неоднорідності призводить до відмінностей напружень в межах 15-20%. При цьому найбільша різниця спостерігається на ділянці між палями ближче до центру фундаментної плити, а при наближенні до краю плити різниця напружень зменшується, як і їх абсолютні величини.

Визначення просторового напружено-деформованого стану фундаментної плити. Для підтвердження достовірності використання НМСЕ в задачах такого класу було проведено порівняння результатів, отриманих в двовимірній постановці МСЕ для розглянутого фрагмент фундаменту з одним рядом паль з аналогічним результатом, отриманим із використанням НМСЕ.

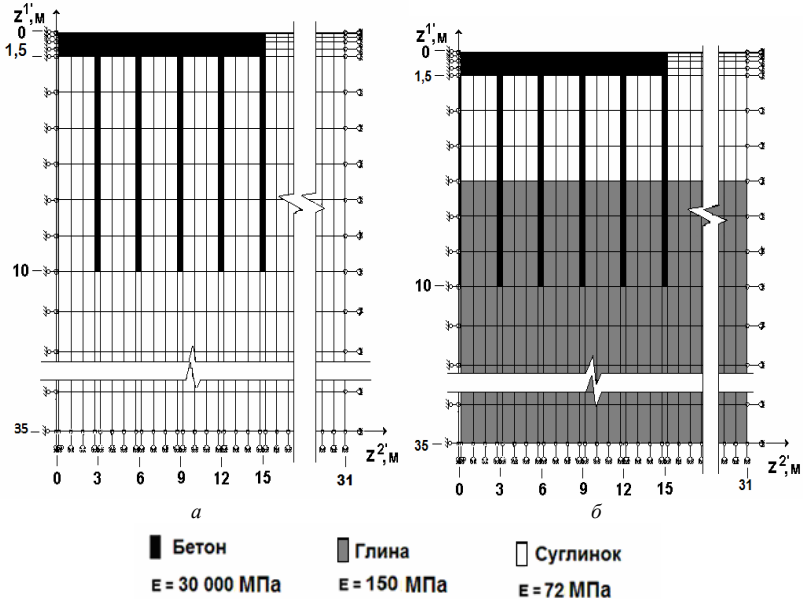


Рис. 4. Дискретна модель фрагмента фундаментної плити з одним рядом паль в двовимірній постановці при застосуванні МС: (а) однорідний ґрунт (б) неоднорідний ґрунт



Рис. 5. Розміщення характерних перерізів для побудови графіків розподілення згинальних напружень по довжині фрагмента плити

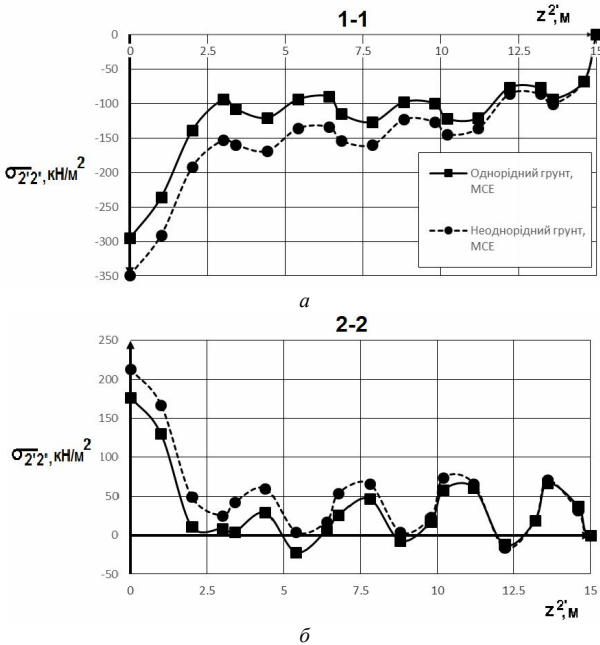


Рис. 6. Розподілення згинальних напружень вздовж ряду паль по верхній (а) та нижній (б) поверхнях фундаментної плити, отримані в двовимірній постановці з використанням МСЕ

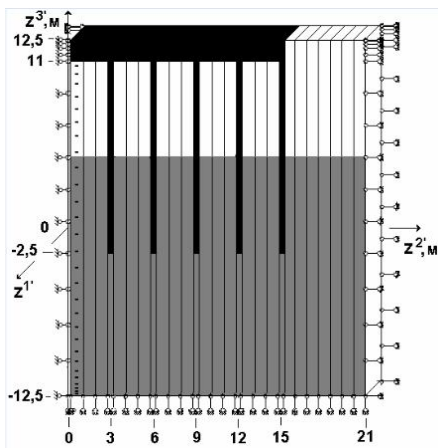


Рис. 7. Дискретна модель НМСЕ для фрагмента фундаментної плити з одним рядом паль

Порівняння проведено для випадку неоднорідного ґрунтового масиву. Відповідна дискретна модель НМСЕ наведена на рис. 7. На дискретній моделі НМСЕ для апроксимації переміщень в напрямку твірної використано 30 членів ряду (2). Величини модуля пружності задані в точках інтегрування вздовж твірної, відповідають моделюванню плити з ґрунтом, плити з палею та ґрунтом, або ґрунту. Як і в попередньому випадку порівняння результатів виконано за величинами

згинальних напружень вздовж верхньої і нижньої поверхні плити. З графіків розподілу згинальних напружень, зображених на рис. 6,а та 6,б видно, що отримані двома методами значення напружень вздовж ряду паль по верхній та нижній поверхнях фундаментної плити збігаються. Це свідчить про достовірність результатів, одержаних при розв'язанні задачі за допомогою НМСЕ: відмінність відповідних значень напружень, отриманих МСЕ і НМСЕ лежить в межах 3%. Отже, можна зробити висновок про те, що використання напіваналітичного метода скінченних елементів є цілком достовірним для розв'язання зазначеної задачі та обґрунтованим представленими результатами.

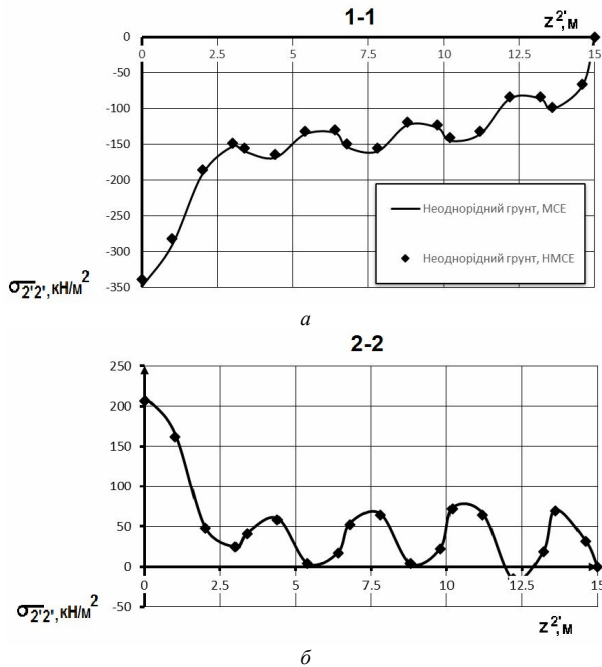


Рис. 8. Розподілення згинальних напружень вздовж ряду паль по верхній (а) та нижній (б) поверхнях фундаментної плити, отримані в двовимірній постановці з використанням МСЕ

Наступним кроком було виконано розв'язання задачі про деформування всієї фундаментної плити за допомогою напіваналітичного метода скінченних елементів в просторовій постановці. В дискретній моделі НМСЕ (рис. 9), аналогічно випадку фрагмента фундаменту з одним рядом паль, задано закон розподілу механічних характеристик вздовж твірної, що відповідає моделюванню фізико-механічних

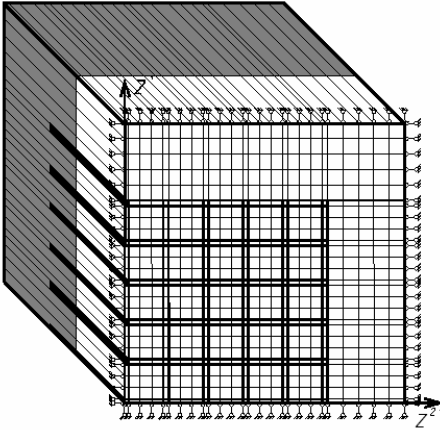


Рис. 9. Дискретна модель досліджуваного об'єкта при використанні НМСЕ

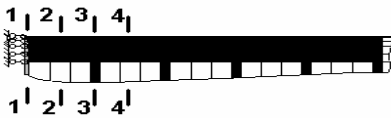


Рис. 10. Розміщення перерізів для побудови графіків розподілу нормальних напружень по товщині фундаментної плити

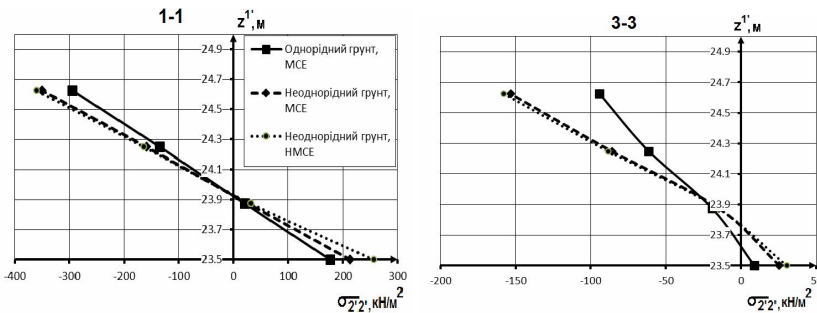


Рис. 11. Розподіл нормальних напружень по товщині фундаментної плити, отриманий в двовимірній та просторовій постановках НМСЕ над палями

характеристик плити, плити палею та ґрунтом, та ґрунту.

Отримані графіки розподілу напружень по товщині фундаментної плити у вказаних перерізах, отримані в просторовій постановці, представлені на рис. 11 та рис. 12. Як видно, величини розтягуючих напружень, отримані в просторовій постановці на 15-20 % перевищують відповідні значення, отримані в двовимірній постановці, в той час як величини стискаючих напружень залишаються практично ідентичними. При цьому змінення напружень в перерізах над палями є більшими.

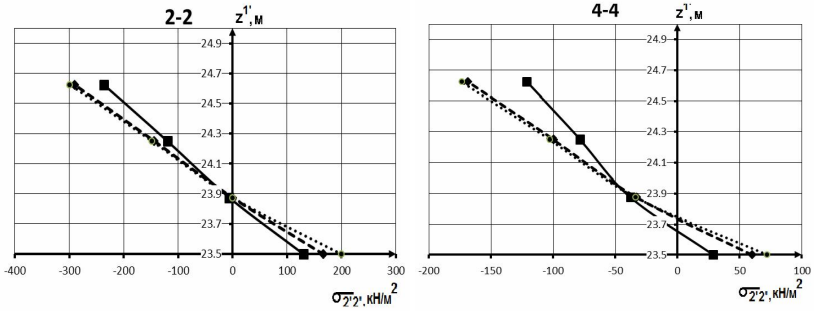


Рис. 12. Розподіл нормальних напружень по товщині фундаментної плити, отриманий в двовимірній та просторовій постановках НМСЕ між палями

Висновок Напіваналітичний метод скінченних елементів дозволяє проводити моделювання просторового напружено-деформованого стану суттєво неоднорідних призматичних тіл. В даному випадку застосування просторової постановки задачі дозволило до 20% уточнити величини напружень в найбільш навантажених областях фундаментної плити.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН. В. 2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. – К.:Мінрегіонбуд України, 2010. – 107с.
2. Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах руйнування просторових тіл : Монографія / [Баженов В. А., Гуляр О. І., Пискунов С. О., Сахаров О. С.]. – К. : КНУБА, 2005. – 298 с.
3. Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах динаміки просторових тіл : Монографія / [Баженов В. А., Гуляр О. І., Сахаров О. С., Солодей І.І. – К. : КНУБА, 2012. – 248 с.
4. *Solodei I.I., Vabishcheych M.O., Sizevych B.I., Chepurna O.O* Effectiveness of semi-analytical finite element method in the numeric analysis of deformation of non-homogeneous 3d constructions subject to initial deviation of form // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. К.: КНУБА, 2015 – Вип.94. – С.119-125.

REFERENCES

1. DBN V. 2.1-10-2009 *Osnovy ta fundamenti sporud.* – K.:Minregionbud ukraine 2010. – 107 s.
2. *Napivanalytychnyy metod skinchennykh elementiv v zadachakh ruynuvannya prostorovykh til:* Monohrafiya / [Bazhenov V. A., Hulyar O. I., Pyskunov S. O., Sakharov O. S.]. – K. : KNUBA, 2005. – 298 s.
3. *Napivanalytychnyy metod skinchennykh elementiv v zadachakh dynamiky prostorovykh til :* Monohrafiya / [Bazhenov V. A., Hulyar O. I., Sakharov O. S., Solodey I.I. – K. : KNUBA, 2012. – 248 s.
4. *Solodei I.I., Vabishcheych M.O., Sizevych B.I., Chepurna O.O.* Effectiveness of semi-analytical finite element method in the numeric analysis of deformation of non-homogeneous 3d constructions subject to initial deviation of form // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. К.: КНУБА, 2015 – Вип.94. – С.119-125.

Pyskunov S., Al-Khussein K.

AN ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF THE BASE OF HIGH RISE BUILDING

The determination of the stress-strain state of the foundation plate on a pile-base basis using the traditional FEM of the semianalytic finite element method (SFEM) has been carried out in the article. The study of the results convergence with a consistent increase of the size of the fragment of the soil mass, considered together with the pile foundation was carried out to select the size of the fragment. Displacement values on the direction perpendicular to the foundation plate surface are used as the criterion. The appearance of a soil fragment with a pile foundation allows us to represent it as a prismatic body. Accordingly, in order to construct a spatial discrete model, inhomogeneous prismatic finite elements (FE) are used which represent itself a quadrangular prism. The length of the FE coincides with the characteristic size of the considered "foundation-ground massif" fragment, and the dimensions of the cross-section are determined when constructing a discrete model. The variation of the mechanical properties of the soil massif and the foundation is taken into account by modifying of the material elasticity module along the FE forming. Obtained calculation results are presented in the form of graphs of bending stresses along the upper and lower surfaces of the foundation plate. The results obtained for a single row of piles using FEM in the two-dimensional formulation and the SFEM in the spatial formulation coincide with an error less to 3%. Taking into account the heterogeneity of the soil massif, consisting of riveting and clay, leads to differences in the bending stresses values in the range of 15-20% compared with the consideration of the foundation in a homogeneous soil massif. When comparing the solutions results obtained for a quarter of the foundation plate with adjacent piles, it is shown that the values of the tensile bending stresses on lower surfaces of the base plate obtained in the spatial formulation exceed by 15-20% the corresponding values obtained in the two-dimensional formulation. The values of the compressive bending stresses (obtained on upper surfaces of the base plate) remain practically identical.

Key words: semianalytic finite element method (SFEM), foundation's grillage, heterogeneous soil, stress-strain state, elastic deformation.

Пискунов С.О., Аль-Хуссейн К.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ

В статье представлены результаты определения напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты на свайной основе с использованием полуаналитического метода конечных элементов (ПМКЭ). Проведено сравнение результатов полученных для однородного и неоднородного грунтового массива, а также в двумерной и пространственной постановках.

Ключевые слова: полуаналитический метод конечных элементов (ПМКЭ), фундаментная плита, неоднородный грунтовый массив, напряженно-деформированное состояние, упругое деформирование.

УДК 539.3

*Пискунов С.О., Аль-Хуссейн К.***Аналіз напружено-деформованого стану фундаментної плити багатопверхового будинку** // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – Вип. 97. – С. 79-89.*Розглядається постановка і результати скінчено елементного розв'язання задачі про вплив неоднорідності ґрунтової основи на напружено-деформований стан фундаментної плити багатопверхового будинку.*

Табл. 0. Іл. 12. Бібліогр. 4 назв.

UDC 539.3

*Pyskunov S., Al-Khussein K.***An analysis of stress-strain state of the base of high rise building** // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2016. – Issue 97. – P. 79–89.*The statement and finite-element decision of the problem about effect of soil substructure nonhomogeneity on a stress-strain state of the base of high rise building has been done.*

Table 0. Fig. 12. Ref. 4.

УДК 539.3

*Пискунов С.О., Аль-Хуссейн К.***Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты многоэтажного здания** // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2016. – Вип. 97. – С. 79-89.*Рассматривается постановка и конечноэлементное решение задачи о влиянии неоднородности ґрунтового основания на напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты многоэтажного здания.*

Табл. 0. Рис. 12. Библиогр. 4 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки КНУБА ПИСКУНОВ Сергій Олегович.**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Пискунов Сергій Олегович.**Адреса домашня:** 03087, Україна, м. Київ, вул. Іскрівська б.3, кв.10**Роб. тел.** +38(044) 245-55-55;**мобільний тел.:** +38(050) 962-66-14.**E-mail** [s_piskunov@ua.fm](mailto:piskunov@ua.fm)**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** магістрант кафедри будівельної механіки КНУБА АЛЬ-ХУССЕЙН Катерина**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Аль-Хуссейн Катерина.**Адреса домашня:** 03039 Україна, м. Київ, просп. Науки 6, кв. 203**мобільний тел.:** +38(093) 872-96-22;**E-mail** – kateryna.alkhussein@gmail.com