

АНОТАЦІЯ

Кашоїда О.О. Взаємодія пальових фундаментів з ґрунтовими основами при врахуванні зміни жорсткості конструкцій будівлі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19 – Архітектура та будівництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури. Міністерство освіти і науки України, Київ, 2023 р.

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота розвиває методи числового моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовими основами, її особливістю є врахування впливу зміни жорсткості надземних конструкцій будівель на формування напружено-деформованого стану фундаментів. Моделювання без врахування жорсткості однієї із складової системи «основа – фундамент – надземні конструкції» призводить до формування некоректного напружено-деформованого стану всієї системи. У роботі виконано дослідження впливу жорсткості надземних конструкцій та стиків між збірними залізобетонними елементами житлового будинку на напружено-деформований стан пальового фундаменту. Показано, що за допомогою зміни жорсткості несучих стін підвального поверху можливо впливати на напружено-деформований стан пальового фундаменту, досягаючи перерозподілу зусиль у фундаменті.

Числове моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовою основою виконано за допомогою наступних варіантів моделі основи:

1. Одновузлові скінченні елементи постійної жорсткості, що моделюють палі. Жорсткість таких скінченних елементів визначається на основі польових випробувань палей статичним навантаженням або наближено на основі даних про оточуючий палю ґрунт. Недоліком даного варіанту є неврахування взаємного впливу між палями, що проявляється у рівномірному

завантаженні паль та незначних різниць осідань по плиті ростверку, що веде до недооцінки згинальних моментів.

2. Групою одновузлових скінченних елементів перемінної жорсткості, що з'єднані між собою стержнями які володіють жорсткістними характеристиками палі. Жорсткість одновузлових скінченних елементів визначається автоматично за декілька ітерацій, на основі наступних характеристик ґрунту: модуля деформації (E), коефіцієнта Пуассона (ν) та коефіцієнту пропорційності (k). Недоліком такого варіанту числового моделювання є те, що використання паль різної довжини призводить до формування некоректного напружено-деформований стан системи «основа – фундамент – надземні конструкції».

3. Моделювання палі виконано стержнем, а оточуюче ґрунтове середовище моделюється об'ємними скінченними елементами поведінка яких описується пружними або нелінійно-деформованими законами деформування з різними критеріями міцності.

Тестування методики числового моделювання взаємодії пального фундаменту з ґрунтовим середовищем буде виконано на основі даних натурних випробувань групи паль. Порівняння методів числового моделювання взаємодії пального фундаменту та ґрунтового середовища із навантаженням групи паль показало наступні основні результати.

Використання одновузлового скінченного елементу постійної жорсткості призводить до доброї кореляції поздовжніх зусиль у палях із даними пального експерименту тільки коли палі навантажені значно менше від їх несучої величини здатності (близько 50% несучої здатності палі). Порівняння розрахункових та вимірних поздовжніх зусиль у палях показує різницю в межах 25%. Слід відмітити, що такий підхід взагалі виключає врахування взаємного впливу між палями, що є нехарактерно для роботи групи паль та призводить до мінімальної різниці осідань плити ростверку, але в свою чергу призводить до недооцінки згинаючих моментах у ній та хибного

конструювання, що є небезпечним при реальному проектуванні відповідальних будівель.

Застосування групи одновузових скінченних елементів перемінної жорсткості, що моделюють палі призводить до задовільної кореляції поздовжніх зусиль у палях із даними польового експерименту з різницею в межах 15%. Такий підхід дає змогу виявити і проаналізувати перерозподіл зусиль між палями, але за таким підходом прогнозується завищена величина різниці осідань плити ростверку в порівнянні із експериментом, що призводить до завищених значень згинальних моментів у плиті ростверку.

Використання моделі де ґрунтове середовище представлено об'ємними скінченними елементами, із різними законами деформування показує відмінність у поздовжніх зусиллях в палях із польовим експериментом: до – 20%. Можна спостерігати перерозподіл зусиль у групі палей. Такий підхід до числового моделювання взаємодії пального фундаменту із ґрунтовою основою дає можливість врахувати можливе включення ростверку у перерозподіл навантажень на ґрунт.

Коректне числове моделювання жорсткості будівельних конструкцій із збірного залізобетону можливе при врахуванні примикання окремих її елементами між собою. Врахування жорсткості горизонтальних стиків, що заповнені розчином та вертикальних стиків із врахуванням закладних деталей дозволяє отримати коректний напружено-деформований стан системи «основа – фундамент – надземні конструкції».

Виявлено, що введення у модель надземних конструкцій із збірного залізобетону вертикального шва між стіновими панелями підвального поверху призводить до зміни розтягнутої зони у фундаментній плиті (ростверку) та зміни величини згинального моменту.

За допомогою зміни жорсткості несучих конструкцій будинку можливо керувати напружено-деформованим станом системи «основа – фундамент – надземні конструкції». Так введення додаткових несучих залізобетонних стін

у підвальному поверсі, дозволило зменшити згинаючі моменти у плиті ростверку до 1,5 рази.

В першому розділі виконано аналіз існуючих технологій влаштування пальових фундаментів та методів їх розрахунку. Визначено як впливає геометрична форма і переріз палі на її жорсткість та несучу здатність.

Виявлено, що не співпадіння центрів ваги несучих конструкцій, відповідно і їх жорсткостей та фундаменту призводить до нерівномірних осідань. Також неврахування центрів ваги призводить до нерівномірності завантаження паль в окремих зонах.

У другому розділі виконано аналіз моделей ґрунтового середовища, що використовуються для числового моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовою основою.

Показано, що пружно-пластичні моделі ґрунту є ефективними нелінійними моделями, що дозволяють розрахунковим шляхом отримати коректний напружено-деформований стан системи «основа – фундамент – надземні конструкції». Критерій міцності Кулона-Мора описує пружно-пластичну поведінку матеріалу, дозволяє отримати наближені результати в загальних випадках нелінійних розрахунків ґрунтової основи при оцінці несучої здатності, тому широко використовується при числовому моделюванні. Використання критерію міцності Кулона-Мора має недоліки: середнє головне напруження не впливає на міцність, що протирічить реальній поведінці ґрунтів при випробуваннях; меридіан і крива руйнування для закону Кулона-Мора мають лінійну форму, так що параметр міцності (кут внутрішнього тертя) не залежить від гідростатичного тиску.

У третьому розділі на базі польового випробування групи з 9 паль, було виконано числове моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовою основою із використанням різних моделей взаємодії паль з основою. Порівнявши отримані результати зроблено наступні висновки.

Визначено, що застосування одновузлового скінченного елемента постійної жорсткості, який моделює палі можна допустити у першому наближенні тільки коли на палі передається навантаження, яке менше 50% її несучої здатності, але в такому випадку фундамент буде працювати нераціонально. Також така модель не може враховувати перерозподіл навантаження між палями та зміну жорсткості ґрунтової основи в процесі її деформації, що призводить до хибного проектування і прийняття таких же рішень.

Встановлено, що використання групи одновузлових скінченних елементів перемінної жорсткості, що моделюють палі, дає змогу отримати задовільну кореляцію результатів осідання палей в порівнянні із польовим дослідженням (різниця в середньому складає біля 15%). Такий підхід дає змогу виявити перерозподіл зусиль між палями та запроектувати пальовий фундамент з певним запасом.

Показано, що використання об'ємних скінченних елементів з пружним законом деформування у якості ґрунтового середовища призводить до доброї кореляції результатів моделювання у порівнянні із експериментальними даними як поздовжніх зусиль в палях так і осідань ростверку. Встановлено, що числове моделювання за таким методом дозволяє виявити перерозподіл між палями.

Визначено, що використання пружно-пластичних моделей ґрунту призводить до більшої збіжності результатів моделювання, в порівнянні із пружним законом деформування та до кращої кореляції результатів моделювання із польовим випробуванням. Виявлено, що такий підхід дає змогу виявити перерозподіл зусиль між палями, але розрахункові поздовжні зусилля будуть відрізнятись від фактичних, отриманих при експерименті до 30%.

Також було визначено закономірність у визначенні розподілу навантаження між палями в залежності від їх розташування у пальовому фундаменті. Тобто знаючи середнє навантаження на палю N можна виконати

прогноз зусилля, що буде у ній виникати: у кутовій палі – $1,15N$; у середній палі – $1,0N$; у центральній палі – $0,7N$.

Запропоновано методику числового моделювання напружено-деформованого стану системи «основа – фундаменти – надземні конструкції», яка дозволяє врахувати вплив жорсткості несучих конструкцій на напружено-деформований стан пальового фундаменту.

У четвертому розділі для експериментального будинку було виконано порівняння напружено-деформованого стану пальового фундаменту та вертикальних несучих елементів підвального поверху в залежності від методу числового моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовою основою. На стадії влаштованого залізобетонного каркасу будівлі та огорожуючих конструкцій було виміряно фактичні осідання плити ростверку і в подальшому на основі цих даних було виконано порівняння розрахункових значень та фактичних величин переміщень у контрольних точках.

Порівняння фактичних і розрахункових переміщень плити ростверку показало, що прогнозовані розрахунком із використанням одновузлових скінченних елементів постійної жорсткості деформації є заниженими у 1,5 рази. Визначено, що застосування моделі із одновузловими скінченними елементами постійної жорсткості моделює напружено-деформований стан пальового фундаменту, який якісно відрізняється на краях і в центральній зоні плити ростверку, також характер епюри згинальних моментів суттєво відрізняється від епюри інших варіантів числового моделювання. Використання моделі із одновузловими скінченними елементами постійної жорсткості прогнозує найменші абсолютні значення напружень у вертикальних елементах, що призводить до недооцінки напружено-деформованого стану та зниженню надійності проектних рішень.

Використання моделі палі із групою одновузлових скінченних елементів перемінної жорсткості прогнозує напружено-деформований стан

пального фундаменту, який має найбільші кількісні значення ординат епюри згинаючих моментів у плиті ростверку. Порівняння фактичних і розрахункових осідань плити ростверку показало, що переміщення за таким методом числового моделювання взаємодії пальового фундаменту із ґрунтовою основою є завищеними до 5 разів.

Використання об'ємних скінченних елементів у якості ґрунтового середовища прогнозує напружено-деформований стан, при якому майже рівномірно завантажуються вертикальні несучі елементи каркасу при умові, що врахований контакт ростверку із ґрунтом. Порівняння фактичних і розрахункових переміщень плити ростверку показало, що осідання є завищеними до 2 разів, що є достатнім показником із врахуванням відповідальності конструкції.

Встановлено, що використання покрокового зростання навантаження, врахування зміни жорсткості надземних конструкцій, що відповідає реальним етапам їх зведення, за рахунок поступової появи елементів моделі та введення обмеження поздовжнього зусилля у палі до межі її несучої здатності, дозволяє отримати уточнені значення напруження у вертикальних несучих елементах, що на 20% менші ніж без такого врахування.

Дослідження впливу жорсткості підвального поверху будівель із збірного залізобетону на напружено-деформований стан пальового фундаменту показало, що згинальні моменти у плиті ростверку чутливі до розташування вертикальних стиків у стінових панелях. Виявлено, що використання монолітних конструкцій для стін підвального поверху у якості вертикальних несучих елементів завжди буде призводити до перерозподілу вертикальних напружень із зменшенням їх пікових значень. Також застосування монолітних конструкцій у якості стін підвалу призводить до зменшення екстремумів на епюрі згинальних моментів у плиті ростверку.

Результати роботи виконаної аспірантом Кашоїдою О.О. в межах його дисертаційного дослідження на тему: «Взаємодія пальових фундаментів з

грунтовими основами при врахуванні зміни жорсткості конструкцій будівлі» впроваджені на експериментальному об'єкті: «Будівництво житлового комплексу для військовослужбовців та членів їх сімей по вул. Магнітогорській, 5 в Деснянському районі м. Києва. 1-ша черга будівництва», дозволило обрати раціональний варіант підсилення фундаментів та вертикальних несучих елементів даного будинку.

Ключові слова: пальовий фундамент, числове моделювання, одновузлові скінченні елементи, об'ємні скінченні елементи в якості ґрунтового середовища, стики між збірними конструкціями, жорсткість, управління жорсткістю.

ABSTRACTS

Kashoida O.O. Interaction of pile foundations with soil bases when taking into account changes in the stiffness of building structures.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 - Civil Engineering and Construction, branch of knowledge 19 - Architecture and Construction - Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The main content of the dissertation

This thesis develops methods for numerical modeling of the interaction of pile foundations with soil foundations; its peculiarity is to take into account the effect of changes in the stiffness of aboveground building structures on the formation of the stress-strain state of foundations. Modeling without taking into account the stiffness of one of the components of the "base - foundation - above-ground structures" system leads to the formation of an incorrect stress-strain state of the entire system. The paper investigates the influence of the stiffness of above-ground structures and joints between precast concrete elements of a residential building on the stress-strain state of a pile foundation. It is shown that by changing the stiffness of the bearing walls of the basement floor, it is possible to influence the stress-strain state of the pile foundation, achieving redistribution of forces in the foundation.

Numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil foundation was performed using the following variants of the foundation model:

1. Single-node finite elements of constant stiffness modeling piles. The stiffness of such finite elements is determined on the basis of field tests of piles with static loading or approximated on the basis of data on the soil surrounding the pile. The disadvantage of this option is the failure to take into account the mutual influence between piles, which is manifested in the uniform loading of piles and

insignificant differences in settlements along the raft, which leads to underestimation of bending moments.

2. A group of single-node finite elements of variable stiffness, interconnected by rods that have the stiffness characteristics of the pile. The stiffness of the single-node finite elements is determined automatically in several iterations based on the following soil characteristics: modulus of deformation (E), Poisson's ratio (ν), and proportionality coefficient (k). The disadvantage of this numerical modeling option is that the use of piles of different lengths leads to the formation of an incorrect stress-strain state of the "base - foundation - above-ground structures" system.

3. The pile is modeled by a rod, and the surrounding soil environment is modeled by volumetric finite elements whose behavior is described by elastic or nonlinear deformation laws with different strength criteria.

Testing of the methodology for numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil environment will be performed on the basis of field tests of a group of piles. Comparison of the methods of numerical modeling of the interaction of the pile foundation and the soil medium with the loading of a group of piles showed the following main results.

The use of a single-node finite element of constant stiffness leads to a good correlation between the longitudinal forces in the piles and the field experiment data only when the piles are loaded significantly less than their bearing capacity (about 50% of the pile's bearing capacity). Comparison of the calculated and measured longitudinal forces in piles shows a difference of about 25%. It should be noted that this approach generally excludes the consideration of mutual influence between piles, which is uncharacteristic for the operation of a group of piles and leads to a minimum difference in the settlement of the raft, but in turn leads to underestimation of bending moments in it and incorrect design, which is dangerous in the actual design of critical buildings.

The use of a group of single-node finite elements of variable stiffness modeling piles leads to a satisfactory correlation of the longitudinal forces in the piles with the field experiment data with a difference of 15%. This approach makes it possible to detect and analyze the redistribution of forces between the piles, but it predicts an overestimated value of the difference in the settlement of the raft compared to the experiment, which leads to overestimated values of bending moments in the raft.

The use of a model where the soil medium is represented by volumetric finite elements with different deformation laws shows a difference in longitudinal forces in piles with the field experiment: up to 20%. Redistribution of forces in a group of piles can be observed. This approach to numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil base makes it possible to take into account the possible inclusion of the raft in the redistribution of loads on the soil.

Correct numerical modeling of the stiffness of precast concrete building structures is possible when taking into account the abutment of its individual elements with each other. Taking into account the stiffness of horizontal joints filled with mortar and vertical joints with embedded parts allows obtaining the correct stress-strain state of the "base - foundation - above-ground structures" system.

It was found that the introduction of a vertical joint between the wall panels of the basement floor into the model of above-ground structures made of precast concrete leads to a change in the tensile zone in the foundation slab (raft) and a change in the value of the bending moment.

By changing the stiffness of the building's load-bearing structures, it is possible to control the stress-strain state of the "base - foundation - above-ground structures" system. For example, the introduction of additional reinforced concrete bearing walls in the basement made it possible to reduce the bending moments in the raft by up to 1.5 times.

The first part analyzes the existing technologies of pile foundations and methods of their calculation. It is determined how the geometric shape and cross-section of a pile affect its stiffness and bearing capacity.

It is found that the mismatch of the centers of gravity of load-bearing structures, and, accordingly, their stiffness and foundation, leads to uneven settlements. Failure to take into account the centers of gravity also leads to uneven loading of piles in certain zones.

In the second part analyzes the soil environment models used for numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil base.

It has been shown that elastic-plastic soil models are effective nonlinear models that allow to obtain the correct stress-strain state of the "base - foundation - above-ground structures" system by calculation. The Coulomb-Mohr strength criterion describes the elastic-plastic behavior of the material, allows obtaining approximate results in general cases of nonlinear calculations of the soil foundation when assessing the bearing capacity, and is therefore widely used in numerical modeling. The use of the Coulomb-More strength criterion has disadvantages: the average principal stress does not affect the strength, which contradicts the actual behavior of soils during testing; the meridian and the fracture curve for the Coulomb-More law have a linear shape, so that the strength parameter (angle of internal friction) does not depend on hydrostatic pressure.

In the third part, based on the field test of a group of 9 piles, numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil base was performed using different models of pile-base interaction. The following conclusions were made by comparing the results.

It has been determined that the use of a single-node finite element of postural stiffness modeling piles can be allowed in the first approximation only when the load is transferred to the piles, which is less than 50% of its bearing capacity, but in this case the foundation will work irrationally. Also, such a model

cannot take into account the redistribution of load between piles and changes in the stiffness of the soil base during its deformation, which leads to incorrect design and decision-making.

It has been established that the use of a group of single-node finite elements of variable stiffness modeling piles allows obtaining a satisfactory correlation of the results of pile settlement compared to the field study (the difference is about 15% on average). This approach makes it possible to identify the redistribution of forces between piles and design a pile foundation with a certain margin.

It is shown that the use of volumetric finite elements with an elastic deformation law as a soil medium leads to a good correlation between the simulation results and experimental data of both longitudinal forces in piles and raft settlements. It was found that numerical modeling using this method allows to detect redistribution between piles.

It is determined that the use of elastic-plastic soil models leads to greater convergence of modeling results compared to the elastic deformation law and to a better correlation of modeling results with field testing. It was found that this approach makes it possible to detect the redistribution of forces between piles, but the calculated longitudinal forces will differ from the actual ones obtained in the experiment by up to 30%.

A regularity in determining the load distribution between piles depending on their location in the pile foundation was also determined. That is, knowing the average load on the pile N , it is possible to predict the force that will occur in it: in the corner pile - $1.15N$; in the middle pile - $1.0N$; in the central pile - $0.7N$.

A methodology for numerical modeling of the stress-strain state of the system "base - foundations - above-ground structures" is proposed, which allows taking into account the influence of the stiffness of load-bearing structures on the stress-strain state of the pile foundation.

In the fourth part, the stress-strain state of the pile foundation and vertical bearing elements of the basement floor was compared for the experimental building, depending on the method of numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil base. At the stage of the reinforced concrete frame of the building and enclosing structures, the actual settlements of the raft were measured and, based on these data, the calculated values and actual values of displacements at the control points were compared.

Comparison of the actual and calculated displacements of the raft showed that the deformation predicted by the calculation using single-node finite elements of constant stiffness is underestimated by a factor of 1.5. It was determined that the use of the model with single-node finite elements of constant stiffness simulates the stress-strain state of the pile foundation, which is qualitatively different at the edges and in the central zone of the raft, and the nature of the bending moment diagram differs significantly from the diagrams of other numerical modeling options. The use of a model with single-node finite elements of constant stiffness predicts the smallest absolute values of stresses in vertical elements, which leads to underestimation of the stress-strain state and reduced reliability of design solutions.

The use of a pile model with a group of single-node finite elements of variable stiffness predicts the stress-strain state of the pile foundation, which has the largest quantitative values of the ordinates of the bending moment diagram in the raft. Comparison of the actual and calculated settlements of the raft showed that the displacements by this method of numerical modeling of the interaction of the pile foundation with the soil base are overestimated by up to 5 times.

The use of volumetric finite elements as a soil medium predicts a stress-strain state in which the vertical bearing elements of the frame are almost uniformly loaded, provided that the raft contact with the soil is taken into account. Comparison of the actual and calculated displacements of the raft showed that the settlements are overestimated by up to 2 times, which is a sufficient indicator given the responsibility of the structure.

It has been established that the use of a stepwise increase in load, taking into account the change in the stiffness of above-ground structures corresponding to the actual stages of their construction, due to the gradual appearance of model elements and the introduction of a limitation of the longitudinal force in the pile to the limit of its bearing capacity, allows us to obtain refined values of stress in vertical bearing elements that are 20% lower than without such consideration.

The study of the influence of the stiffness of the basement floor of precast concrete buildings on the stress-strain state of the pile foundation showed that the bending moments in the raft are sensitive to the location of vertical joints in the wall panels. It was found that the use of monolithic structures for basement walls as vertical load-bearing elements will always lead to redistribution of vertical stresses with a decrease in their peak values. Also, the use of monolithic structures as basement walls leads to a decrease in the extremes on the bending moment diagram in the raft.

The results of the work performed by the postgraduate student Kashoida O.O. within the framework of his dissertation research on the topic: "Interaction of pile foundations with soil bases taking into account changes in the stiffness of building structures" were implemented at the experimental facility: "Construction of a residential complex for servicemen and their families at 5 Magnitogorskaya St. in Desnianskyi district of Kyiv. The 1st stage of construction", allowed to choose a rational option for strengthening the foundations and vertical load-bearing elements of this building.

Keywords: pile foundation, numerical modeling, single-node finite elements, volumetric finite elements as a soil medium, joints between prefabricated structures, stiffness, stiffness control.