

УДК 519.673:624.154

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВИ ФРАГМЕНТУ ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ РОСТВЕРКУ, НЕЗ'ЄДНАНОЇ З ПАЛЕЮ, У НАТУРНИХ УМОВАХ

СЄДИН В. Л.<sup>1\*</sup> *д.т.н., проф.*,БІКУС К. М.<sup>2\*</sup> *к.т.н., доц.*,КОВБА В. В.<sup>3\*</sup> *асп.*ВОЛНЯНСЬКИЙ Ю. Ю.<sup>4\*</sup> *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-1287-666X

<sup>3\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38(056)756-33-43, e-mail: vladislavkovba@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

<sup>4\*</sup> Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

**Анотація. Мета.** Виконати числове моделювання напружено-деформованого стану (НДС) основи фрагменту пальового фундаменту при навантаженні ростверку, нез'єданого з палею, та порівняти з результатами отриманими в натурних умовах. **Методика.** Створення моделі ґрунтової основи пальового фундаменту за умови відсутності з'єднання палі і фрагменту ростверку в ПК Plaxis та поетапне навантаження фрагменту ростверку; використання пружно-пластичної моделі зі зміцненням ґрунту. Для відтворення реальних умов, окрім дослідної палі і ростверку була змодельована частина пальового поля. **Результати.** Отримано картину впливу окремого навантаження ростверку на поведінку палі, нез'єднаної з ним, зафіксовано утворення додаткових дотичних напружень навколо палі, і її переміщення. Результати числового моделювання порівняно з даними натурального експерименту. **Наукова новизна.** Числовим моделюванням відтворено умови натурального експерименту і зафіксовано деформації ґрунту під плитою, які спровокували переміщення не тільки дослідної палі (нез'єднаної з фрагментом ростверку), але й оточуючих паль, розташованих на відстані 3 м. **Практична значимість.** Числове моделювання напружено-деформованого стану фрагменту ростверку і палі демонструє задовільну збіжність з результатами натурального експерименту, що свідчить про адекватно підібрані параметри пружно-пластичної моделі зі зміцненням ґрунту в ПК Plaxis. Висока точність порівняння дозволить передбачати осідання палі і плити, за умови відсутності з'єднання між ними, у складі фундаменту та використовувати ґрунтову модель з підібраними параметрами для подальшого моделювання фундаменту і наземної конструкції.

**Ключові слова:** числове моделювання; поетапне навантаження фрагменту ростверку пальового фундаменту; додаткові дотичні напруження; пружно-пластичну модель зі зміцненням ґрунту

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЯ ФРАГМЕНТА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ НАГРУЖЕНИИ РОСТВЕРКА, НЕСОЕДИНЕННОГО СО СВАЕЙ, В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

СЕДИН В. Л.<sup>1\*</sup> *д.т.н., проф.*,БІКУС Е. М.<sup>2\*</sup> *к.т.н., доц.*,КОВБА В. В.<sup>3\*</sup> *асп.*ВОЛНЯНСКИЙ Ю. Ю.<sup>4\*</sup> *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0003-1287-666X

<sup>3\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38(056)756-33-43, e-mail: vladislavkovba@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

<sup>4\*</sup> Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24а, 49600, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

**Аннотация. Цель.** Выполнить численное моделирование напряжено-деформированного состояния основания фрагмента свайного фундамента при нагружении ростверка, несоединенного со свай, и сравнить с результатами, полученными в натуральных условиях. **Методика.** Создание модели грунтового основания свайного фундаменту при условии отсутствия соединения свай и фрагмента ростверка в ПК Plaxis и поэтапное нагружение фрагмента ростверка; использование упруго-пластичной модели с упрочнением грунта. Для воспроизведения реальных условий, кроме исследуемой свай и ростверка было смоделировано часть свайного поля. **Результаты.** Получена картина влияния отдельного нагружения ростверка на поведение свай, несоединенной с ним, зафиксировано образование дополнительных касательных напряжений вокруг свай, и ее перемещения. Результаты численного моделирования в сравнении с данными натурального эксперимента. **Научная новизна.** Числовым моделированием воспроизведено условия натурального эксперимента и зафиксировано деформации грунта под плитой, которые спровоцировали перемещения не только исследуемой свай (несоединенной с фрагментом ростверка), но и окружающих свай, расположенные на расстоянии 3 м. **Практическая значимость.** Числовое моделирование напряженно-деформированного состояния фрагмента ростверка и свай демонстрирует удовлетворительную сходимость с результатами натурального эксперимента, что свидетельствует про адекватно подобранные параметры упругопластической модели с упрочнением грунта в ПК Plaxis. Высокая точность сравнения позволяет предвидеть осадки свай и плиты, при условии отсутствия соединения между ними, в составе фундамента, и использовать грунтовую модель с подобранными параметрами для дальнейшего моделирования фундамента и надземной конструкции.

**Ключевые слова:** численное моделирование; поэтапное нагружение фрагмента ростверка свайного фундамента; дополнительные касательные напряжения; упруго-пластическая модель с упрочнением грунта

## NUMERICAL SIMULATION OF THE STRESS STRAIN STATE OF BASE OF THE PILE FOUNDATIONS' FRAGMENT BY THE LOADING OF THE RAFT, NOT CONNECTED WITH THE PILE, IN THE CONDITIONS OF FIELD TEST

SEDIN V. L.<sup>1\*</sup> *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
BIKUS K. M.<sup>2\*</sup> *Ph. D., Assos. prof.*,  
KOVBA V. V.<sup>3\*</sup> *postgraduate student*,  
VOLNIANSKYI Yu. Yu.<sup>4\*</sup> *postgraduate student*

<sup>1\*</sup> Foundation Engineering Department, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

<sup>2\*</sup> Foundation Engineering Department, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-1287-666X

<sup>3\*</sup> Foundation Engineering Department, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38(056)756-33-43, e-mail: vladislavkovba@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

<sup>4\*</sup> Foundation Engineering Department, Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

**Annotation. Purpose.** Perform numerical simulation of the stressed strain state of the base of the pile foundation fragment by the loading of the raft, not connected with the pile and compare it with the results obtained under field conditions. **Methodology.** Creation of a model of the ground foundation of a pile foundation provided that there is no pile connection and a rafts' fragment in the SC Plaxis and the staged loading of the fragment of the raft; use hardening soil model. To reproduce real conditions, in addition to the pile and plate studied, part of the pile investigation was modeled. **Results.** The picture of the effect of a single load of the raft on the behavior of the pile unconnected with it was obtained, the formation of additional tangential stresses around the pile and its displacement was recorded. Results of numerical modeling in comparison with the data of the field experiment. **Originality.** Numerical simulation was reproduced the conditions of full-scale experiment and fixed deformations of the soil under the plate, which provoked the movement not only of the pile being investigated (not connected with the fragment of the grillage), but also of surrounding piles located at a distance of 3 m. **Practical value.** Numerical modeling of the stress-strain state of the raft and pile fragment demonstrates satisfactory convergence with the results of the full-scale experiment, which indicates adequately selected parameters of the elastoplastic model with hardening of the soil in SC Plaxis PC. The high accuracy of the comparison allows us to anticipate the drafts of the pile and raft, provided there is no connection between them, as part of the foundation, and use a ground model with matched parameters for further modeling of the foundation and above-ground structure.

**Keywords:** numerical simulation; staged loading of the rafts' fragment of the pile foundation; additional tangential stresses; hardening soil model

### Вступ

В умовах розвитку геотехнічного будівництва, пов'язаного з проблемами збільшення навантажень

на основі фундаментів споруд в складних інженерно-геологічних умовах, комп'ютерні програми для інженера відіграють дуже важливу роль. Традиційні інженерні методики не дозволяють

достатньо достовірно оцінити НДС основ без використання потужних програмних комплексів.

Для вирішення складних геотехнічних задач все частіше застосовуються програмні комплекси на основі методу скінчених елементів. Використання таких комплексів вимагає особливої уваги до моделей ґрунтової основи [1] та призначення їх параметрів. Однак навіть при ідеально підібраних методиці та параметрах численних розрахунків в реальних ґрунтових умовах виникають відхилення [6].

Метод скінчених елементів (МСЕ) є основним методом сучасної механіки ґрунтів, що лежить в основі переважної більшості сучасних геотехнічних програмних комплексів, призначених для виконання розрахунків основ і фундаментів сумісно з наземними конструкціями. Даний метод заснований на представленні реальної континуальної конструкції її дискретною моделлю і заміні диференціальних рівнянь, що описують напружено-деформований стан суцільних тіл, системою алгебраїчних рівнянь. Перевагою МСЕ для розв'язання геотехнічних задач є можливість розрахунку взаємодії елементів пального фундаменту висотної будівлі з ґрунтовою основою без поділу на незалежні розрахунки за двома групами граничних станів тощо [2].

Достовірність визначення несучої здатності пальных фундаментів і майбутньої деформативності ґрунтів їх основи, звичайно, у першу чергу залежить від якості інженерно-геологічних вишукувань та натурних випробувань ґрунтів, проте чисельне моделювання роботи паль і пальных фундаментів за допомогою сучасних інструментів (розрахункових програмних комплексів (ПК), що отримали сьогодні широке розповсюдження, може значно спростити і пришвидшити цей процес, надавши при цьому достатньо точні результати для потреб проектування.

Найбільш надійним способом для перевірки адекватності скінчено-елементного розрахунку є порівняння з результатами натурних випробувань і експериментів, оскільки, маючи результати НДС отримані у натурних умовах, можна за допомогою тестових розрахунків знайти найбільш підходящу методику моделювання з урахуванням регіональних інженерно-геологічних умов [4].

ПК PLAXIS 3D є спеціалізованим тривимірним програмним забезпеченням для вирішення геотехнічних задач. За допомогою PLAXIS 3D можливо проводити нелінійні обчислення, використовуючи надійні, теоретично та практично обґрунтовані обчислювальні моделі.

Серед моделей ґрунту, що застосовуються для чисельних розрахунків, необхідно виділити нелінійну пружно-пластичну модель зі зміцненням ґрунту (Hardening Soil Model (HSM)). Питання порівняння результатів при використанні різних ґрунтових моделей, в тому числі HS, займалися багато інженерів-геотехніків [8] На відміну від моделі Мора – Кулона, перевагами HSM є залежність жорсткості від напружень, і урахування різниці жорсткостей при

первинному навантаженню ґрунту та при його розвантаженні з подальшим навантаженням. Модулі об'ємного стиснення і зрушення в HSM не постійні, а залежать від діючого рівня напружень, що більше відповідає реальній поведінці ґрунту.

Модель HSM вдало підходить для розрахунку глибоких котлованів, пальных фундаментів з суцільним ростверком тощо [10].

Не дивлячись на те, що за допомогою використання даної моделі можна розв'язати більшість геотехнічних задач, все одно необхідно проводити підбір та перевірку тієї чи іншої моделі в індивідуальних інженерно-геологічних умовах за рахунок розв'язання зворотної задачі, а також створення правильного алгоритму її рішення [9]. Більш детальним вивченням вибору моделі ґрунту та її параметрів для числового моделювання відображено в таких роботах, як [3, 7].

Складність використання даної моделі полягає в правильному введенні додаткових параметрів жорсткості, не вказаних в класичній таблиці нормативних характеристик ґрунтів у складі інженерно-геологічних звітів. Не зважаючи на величезний спектр вхідних даних модель HSM коректно описує залежність жорсткості від напружень та враховує різниці жорсткостей при первинному навантаженню та розвантаженні з подальшим навантаженням.

Основним недоліком моделі є те, що вона не здатна належним чином відтворювати надмірні сили зрушення у випадку, коли кут ділатансії  $\psi$  більший за нуль.

### Мета

У зв'язку з вищевикладеним, виникла необхідність за допомогою числового моделювання у ПК Plaxis 3D дослідити НДС основи фрагменту пального фундаменту при навантаженні плитного ростверку, нез'єданого з палею, використовуючи модель, яка буде описувати поведінку ґрунтової основи та порівняти результати розрахунку з результатами отриманими під час натурального експерименту.

### Планування та методика числового моделювання

Розв'язання поставленої задачі виконувалось МСЕ за допомогою ПК Plaxis 3D, у пружно-пластичній постановці з використанням HSM. У розрахункову область були включені масив ґрунту, фрагмент плитного ростверку ( $h_{пл.}=0,3$  м) і навантаження на ростверк, дослідна паля і сусідні палі пального поля, розташовані на відстані 3 м. Прикладання навантаження відбувалося в три етапи. Результати кожного етапу були початковими умовами для наступного.

Моделювання виконувалося у наступній послідовності:

- створення геометричної схеми моделі ґрунту;

- створення геометричної схеми моделей паль та фрагменту ростверку;
- створення умов, які призводять до виникнення додаткових дотичних напружень (поетапне навантаження плити, 660 кН);
- поетапне розвантаження фрагменту ростверку з дотриманням інтервалу часу

В межах поставленої задачі було виконане числове моделювання циклу поетапного "навантаження – розвантаження" фрагменту плитного ростверку пальового фундаменту, за умови відсутності з'єднання палі з плитою ростверку розмірами 2,6×2,6×0,3 м. Вихідними даними для чисельного моделювання (геометричні показники палі і ґрунтового масиву, фізико-механічні показники ґрунтів, положення палі у плані) були обрані за результатами експерименту, проведеного в натурних умовах та дані звіту інженерно-геологічних вишукувань.

Відомо, що зона впливу палі на оточуючий масив обмежена як по радіусу, так і по глибині, тому в

якості розрахункової, можна розглядати модель масиву обмежених розмірів. У ПК Plaxis 3D в якості розрахункової розглядалась модель масиву багатошарової будови обмежених розмірів 10×10×15 м (рис. 2).

У розрахункову область були включені масив ґрунту, складений з п'яти ІГЕ, дослідна паля і навантаження від фрагменту плити ростверку, що прикладене до неї. Розрахункова схема для моделювання у ПК Plaxis 3D наведена на рис. 1. У таблиці 1 наведені фізико-механічні характеристики ґрунтів дослідного майданчику з адаптованими для використання під час розрахунку пружно-пластичної моделі зі зміцненням ґрунту. За відсутності додаткових характеристик модулів деформації, їх слід визначати за рекомендаціями [5].

Під час моделювання масиву ґрунту на початковому етапі розрахунку використовувалася функція K0-procedure, за допомогою якої можна регенерувати вертикальні напруження в стані рівноваги за власною вагою.

Таблиця 1

**Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів для HSM /  
Characteristics of physical and mechanical properties of soils for HSM**

Параметр	Позна-чення	Інженерно-геологічний елемент (ІГЕ)					Од. вим.
		ІГЕ-3	ІГЕ-4	ІГЕ-5	ІГЕ-6	ІГЕ-7	
Тип поведінки матеріалу	<i>Type</i>	Пісок	Суглинок	Суглинок к	Пісок	Пісок	
Тип поведінки матеріалу	<i>Type</i>	Дренований (Drained)					
Питома вага ґрунту вище РГВ	$\gamma_{un\ sat}$	19,1	16,7	17,5	19,2	19,4	кН/м <sup>3</sup>
Питома вага ґрунту нижче РГВ	$\gamma_{sat}$	19,1	16,7	17,5	19,2	19,4	кН/м <sup>3</sup>
Січний модуль деформації при 50 % руйнуючого девіаторного напруження	$E_{50}^{ref}$	26100	5400	6480	27000	31500	кН/м <sup>2</sup>
Дотичний модуль деформації при компресійних випробуваннях	$E_{oed}^{ref}$	26100	10800	1296	27000	31500	кН/м <sup>2</sup>
Модуль деформації при розвантаженні і повторному навантаженні	$E_{ur}^{ref}$	78300	32400	64800	81000	94500	кН/м <sup>2</sup>
Ступінь жорсткості, для гіперболічної залежності від напружень	<i>m</i>	0,75	0,5	0,5	0,55	0,55	–
Зчеплення	$c_{ref}$	2	10	13,4	2	1	кН/м <sup>2</sup>
Кут внутрішнього тертя	$\varphi$	31	13	14	31	34	°
Кут дилатації	$\psi$	1	0	0	1	4	°
Коефіцієнт Пуассона при повторному навантаженні	$\nu_{ur}$	0,30	0,4	0,4	0,30	0,30	–
Коефіцієнт бічного тиску	$K_0$	0,69	0,78	0,76	0,48	0,44	–
Коефіцієнт пористості	<i>e</i>	0,642	0,887	0,818	0,63	0,593	–
Коефіцієнту зниження міцності	$R_{int}$	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	

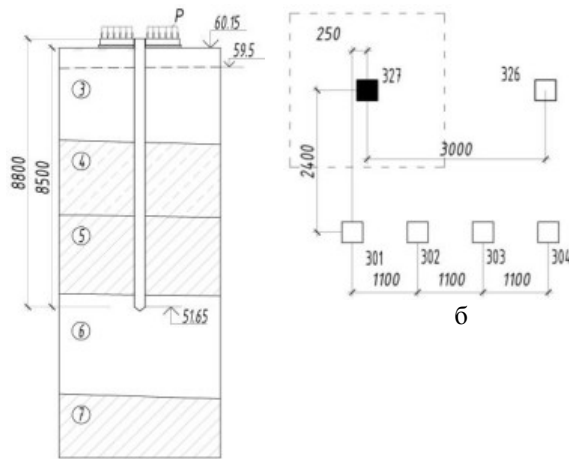


Рис. 1. Схема розташування палей в плані (б) та переріз для моделювання навантаження палі та фрагменту ростверку(б):  $p$  – навантаження на фрагмент плити ростверку. / The layout of the piles in the plan and the cross section for modeling the load of the pile and the plates' fragment in the Plaxis 3D:  $p$  - the load on the fragment of the plate s' raft

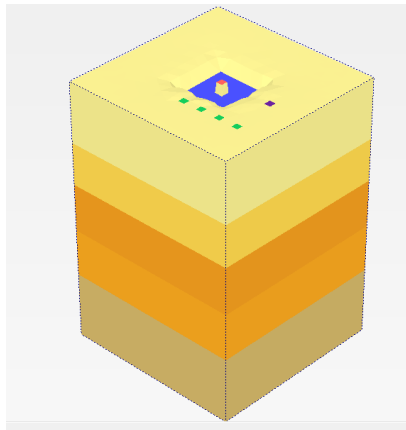


Рис. 2. Геомеханічна скінченно-елементна модель ґрунтової основи та фрагменту пального фундаменту в ПК Plaxis 3D / Geomechanical finite elemental model of ground base of pile foundation fragment in SC Plaxis 3D

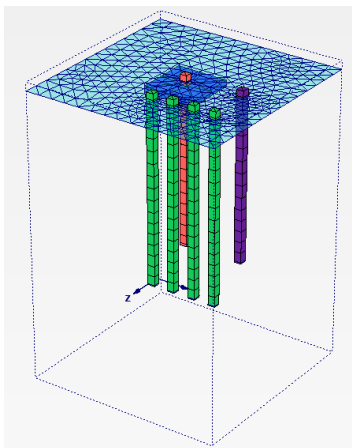


Рис. 3. Модель фрагменту пального фундаменту в ПК Plaxis 3D / Model of a pile foundation foundation in SC Plaxis 3D

Для використання K0-procedure необхідно враховувати деяке спрощення, щоб усі шари ґрунту були паралельні, так як повна рівновага досягається тільки у випадку рівномірного паралельного контакту шарів [5].

Під час розрахунку необхідно враховувати значення коефіцієнту бічного тиску  $K_0$ , оскільки при неправильному використанні в розрахунках його значень можливе виникнення точок чи областей пластичних деформацій на стадії формування початкового напруженого стану [5]. На практиці значення  $K_0$  для нормально ущільненого ґрунту часто допускається визначати за емпіричною формулою:  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ . У випадку розрахунку щільного ґрунту значення  $K_0$  не співпадає із результатом отриманим за вищевказаною формулою.

На наступному етапі моделювались дві палі довжиною 8,8 м та чотири палі – по 10,1 м з характеристиками наведеними у таблиці 2.

Таблиця 2

#### Характеристики палі, та властивості матеріалу палі / Characteristics of the pile, and the properties of the material of pile

Параметр	Позначення	Палі	Од. вим.
Діаметр	$d$	0,35	м
Об'ємна вага	$\gamma$	25	кН/м <sup>3</sup>
Тип поведінки	Type	Лінійне, ізотропне	–
Модуль Юнга	$E1$	$3 \cdot 10^7$	кН/м <sup>2</sup>
Коефіцієнт Пуассона	$\nu$	0,2	–

Навколо палі № 327 (див. рис. 1) була виготовлена плита товщиною 30 см (з'єднання між елементами фундаменту відсутнє), характеристики якої наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

#### Характеристики плити, та властивості матеріалу плити / Characteristics of the plate, and the properties of the material of plate

Параметр	Позначення	Плита	Од. вим.
Товщина	$h$	0,3	м
Об'ємна вага	$\gamma$	25	кН/м <sup>3</sup>
Тип поведінки	Type	Лінійне, ізотропне	–
Модуль Юнга	$E1$	$3 \cdot 10^7$	кН/м <sup>2</sup>
Коефіцієнт Пуассона	$\nu$	0,2	–

Під час розв'язання поставленої задачі, була приділена увага моделюванню об'ємної палі квадратного перерізу. Палі моделювалась за рахунок створення просторового об'ємного елемента з розмірами перерізу 350×350, довжиною 8,8 м (рис. 3), якому було назначено характеристики бетону. Під час задавання характеристик було додатково враховано параметри коефіцієнту зниження міцності

$R_{inter}$  для матеріалу палі, за допомогою варіювання яких можна імітувати взаємодію між поверхнями.

Контакт на межі поверхонь палі та ґрунту моделюється шляхом підбору прийнятної величини  $R_{inter}$ . Коефіцієнт відіграє важливу роль для моделювання зчеплення різного типу ґрунту з поверхнею палі, а саме тертя вздовж поверхні палі. Згідно рекомендацій [5] для глинистих ґрунтів параметр  $R_{inter}$  відповідає за зниження міцності на контакт, ґрунту з конструкціями фундаменту.

Коефіцієнт зниження міцності ( $R_{inter}$ ) визначається таким чином, що відношення міцності інтерфейсу до міцності ґрунту становить 2 : 3, згідно рекомендацій посібнику користувача PLAXIS. Таким чином, дотичні напруження та сили тертя які виникають між поверхнею палі та ґрунту моделюються саме завдяки  $R_{inter}$ . Зі зниженням  $R_{inter}$  вплив ґрунту на палю зменшується, тобто матеріали один відносно одного будуть просто проковзувати, не утворюючи при цьому жодних напружень.

У випадку розрахунку елементів фундаменту в умовах додаткових дотичних напружень, значення  $R_{inter}$  відіграє ключову роль, так як неправильне введення значення може просто «виключити» з роботи будь який, елемент фундаменту. Зменшення величини  $R_{inter}$  призводить до зменшення величини навантаження, що втягує палі, і навпаки.

$R_{inter}$  може бути жорстким (Rigid,  $R_{inter}=1,0$ ) використовується, коли інтерфейс повинен мати не меншу міцність, ніж навколишній ґрунт. Наприклад, розширені інтерфейси по кутах конструктивних елементів не відображають взаємодії між ґрунтом і конструкцією, тому значення  $R_{inter}$  не повинні мати меншу величину ніж ґрунт. У результаті властивості інтерфейсів, враховуючи кут ділатансії, будуть такими ж, як і властивості ґрунтів, заданими набором даних, за винятком коефіцієнту Пуассона.

Контролювання значення  $R_{inter}$  (Manual,  $R_{inter}=0,6...0,8$ ) і може створити умови реальної поведінки елементів у ґрунтових умовах, тобто змоделювати "проковзування" палі й не допустити її фіксації з ґрунтом. Під час моделювання обов'язково необхідно враховувати, що для різного типу ґрунту буде змінюватися значення  $R_{inter}$ .

Числове моделювання НДС основи фрагменту пальового фундаменту проводилося з врахуванням проміжків часу, що впливає на якість числового розрахунку. За допомогою параметру інтервал часу (Time interval) контролюється період прикладання навантажень і проведення випробувань взагалі.

На рис. 4 зображені ізолінії переміщень від поетапного навантаження плити.

Розрахунок проведений у ПК Plaxis 3D показав, що дотичні напруження, викликані навантаженням плити виникли не тільки вздовж деякої довжини бічної поверхні палі №327, а й вздовж палі №326. В результаті числового моделювання були помічені переміщення палі №327 на 2,48 мм, а палі №326 на 2,53 мм. Попереднє напруження виникає не тільки безпосередньо під плитою, а й на певній відстані від

неї, що було доведено експериментально і підтверджено числовим моделюванням.

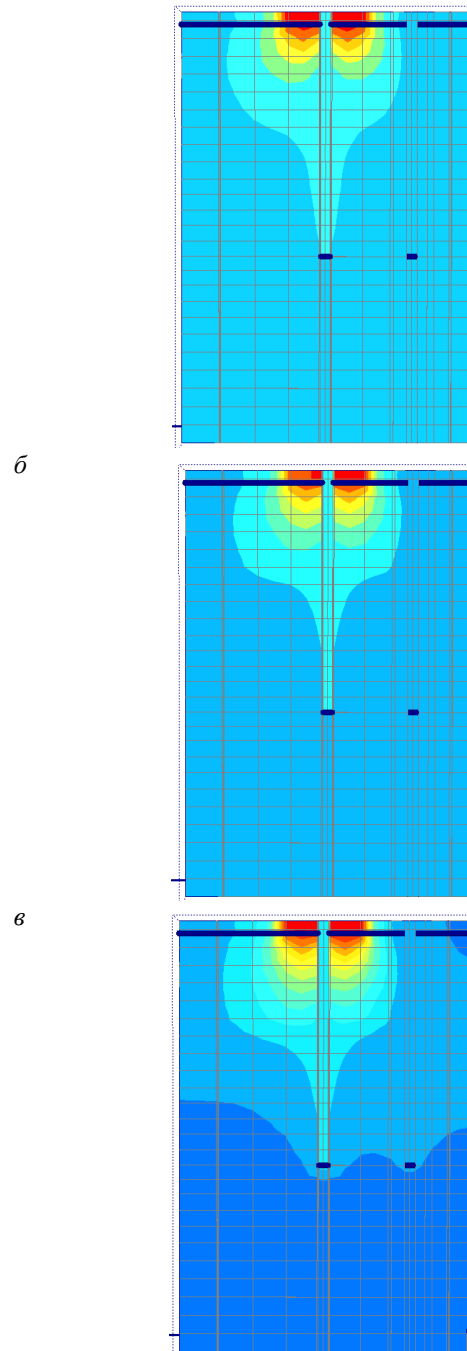


Рис. 4. Ізолінії вертикальних переміщень: а – при I етапі навантаження плити ( $p_{max}=42$  кПа), б – при II етапі навантаження плити ( $p_{max}=74$  кПа), в – при III етапі навантаження плити ( $p_{max}=95$  кПа) /

Isolinium of vertical displacements: а – at the first cycle of plates' loading, б – at the second cycle load of the plate, в – at the third cycle load of the plate

Як вже зазначалось, коректність числового моделювання оцінювалась шляхом співставлення результатів з даними натурних випробувань і експериментальних даних. На рис. 5 представлено їх графічне порівняння.

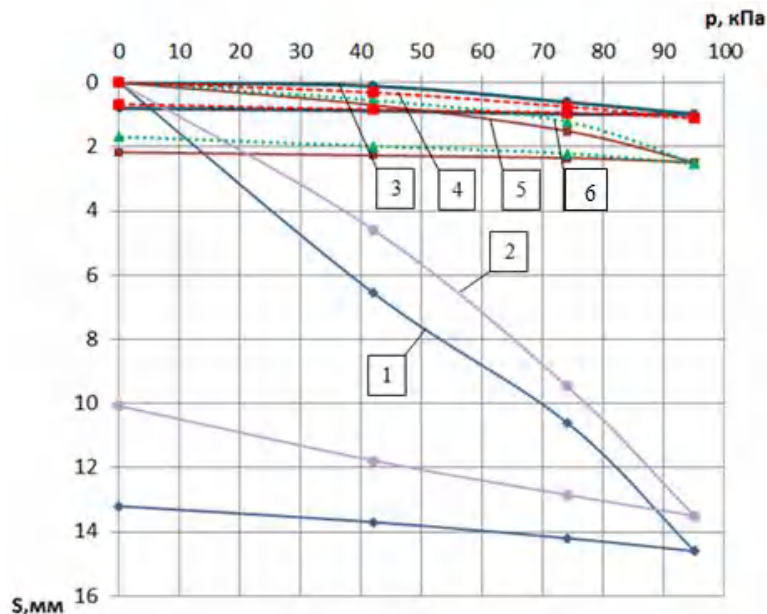


Рис. 5. Графіки "навантаження – осідання" палі та плити: 1 – деформації основи плитного ростверку (натурний експеримент); 2 – деформації основи плитного ростверку (числове моделювання); 3 – переміщення палі №326 (натурний експеримент); 4 – переміщення палі №326 (числове моделювання); 5 – переміщення палі №327 (натурний експеримент); 6 – переміщення палі №327 (числове моделювання) /

Charts "loading - settlement" piles and plate: 1 - data obtained during field testing of plate loads; 2 - data obtained during numerical simulation of plate loads; 3 - pile № 326 obtained during field tests; 4 - pile №326 obtained during numerical simulation; 5 - pile № 327 received during the field tests; 6 - pile № 327 obtained during numerical simulation

З аналізу графіку (рис. 6) видно, що різниця осідань фрагменту плити за результатами числового моделювання 13,5 мм і даними натурального експерименту 14,6 мм складає 7,5%. Різниця осідань дослідної палі №327 за результатами моделювання 2,53 мм та натурним експериментом 2,48 мм складає 2%. Різниця осідань сусідньої палі №326 (розташованої на відстані 3 м від дослідної) за результатами моделювання 1,01 мм та натурним експериментом 0,92 мм складає 10%.

### Висновки

1. За допомогою числового моделювання підтверджено вплив окремого навантаження ростверку на поведінку палі, нез'єднаної з ним. Зафіксовано утворення додаткових дотичних напружень у ґрунті вздовж бічної поверхні палі, і її переміщення на 2,53 мм. При порівнянні з результатами натурального експерименту різниця складає 2%.

2. Числовим моделюванням відтворено умови натурального експерименту і зафіксовано деформації ґрунту під плитою, які спровокували переміщення не тільки дослідної палі №327, (нез'єднаної з фрагментом ростверку), але й сусідньої палі №326, розташованої на відстані 3 м, на 1,01 мм, що відрізняється від натурних значень на 10%.

3. Числове моделювання НДС фрагменту ростверку і палі демонструє задовільну збіжність з результатами натурального експерименту, що свідчить про адекватно підібрані параметри пружно-пластичної моделі зі зміцненням ґрунту в ПК Plaxis. Використання HSM також показало задовільну збіжність при порівнянні осідань фрагменту плитного ростверку в 7,5%. Це дозволить передбачати осідання палі і плити, за умови відсутності з'єднання між ними, для подальшого моделювання фундаменту і наземної конструкції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко І. П. Моделювання нелінійного деформування ґрунтів основи з урахуванням структурної міцності в умовах прибудови / І.П. Бойко, В.О. Сахаров // Будівельні конструкції. - К.: НДІБК. - 2004. - Вип.61. - т.2. - С. 27-33.
2. Винников Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі: Монографія. – Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2016. – 280 с., видання друге, перероблене і доповнене.
3. Голубев А. И. К вопросу о выборе модели грунта для геотехнических расчетов / А.И. Голубев, А.В. Селецкий // Актуальные научно-технические проблемы современной геотехники. Том 2. СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2009. С. 6–10.
4. Знаменский В. В. Сравнение результатов натурных экспериментов с расчетами, выполненными при помощи конечно-элементной программы Plaxis 3D Foundation для забивных свай в глинистых грунтах / В. В. Знаменский,

- А. М. Рузаев, И. Н. Полинков // Вестник Московского государственного строительного университета. – Москва, 2008. – № 2. – С. 18-23
5. Руководство пользователя PLAXIS 3D Foundation. Версия 2 : пер. с англ. / R.B.J. Brinkgreve, W.M. Swolf [и др.]. – Санкт-Петербург: НИП-Информатика, 2007.
6. Седин В. Л. Применение модели упрочняющегося грунта в численном моделировании буронабивной сваи большого диаметра / В.Л. Седин, Е.М. Бикус, В.В. Ковба // Геотехника. – 2014. - №3. – С.32-40
7. Строкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования грунтов / Л. А. Строкова // Известия Томского Политехнического университета. 2008. Т. 313. №1. С. 69–74.
8. Тер-Мартirosян А. З. Определение параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний / А.З. Тер-Мартirosян, А.Ю. Мирный, В.В. Сидоров, Е.С. Соболев // Геотехника. Теория и практика. Общероссийская конференция молодых ученых, научных сотрудников и специалистов: межвузовский тематический сборник трудов. СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2013. С. 141–146.
9. Barla Marco Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling / Barla Marco, Barla Giovanni // Geomechanics and Tunelling. 2012. Vol. 3. pp.214–232.
10. Truty, A., Improved formulation of the hardening soil model in the context of modeling the undrained behavior of cohesive soils / A. Truty, R. Obrzud // Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 37, No. 2, 2015.

## REFERENCES

1. Boyko I.P. and Sakharov B.O. *Modeliuvannia neliniinogo deformuvannia gruntiv osnovy z urakhuvanniam strukturnoi mitsnosti v umovakh prybudovy* [Modeling of nonlinear deformation of soil bases taking into account structural strength under conditions of an extension ] *Budivelni konstruksii* [Building constructions]. - K.: NDIBK, 2004, Vol.61, №2, pp. 27-33. (in Ukrainian).
2. Vinnikov Yu.L. *Matematychni modeliuvannia vzaiemodii fundamentiv z ushchilnenymy osnovamy pry ikh zvedenni ta nastupnii roboti: Monohrafiia* [Mathematical modeling of foundations interaction with compacting basics during their constructions and following work: Monograph] – Poltava: PolNTU imeni Yurii Kondratiuka, 2016, 280 p.. ( in Ukrainian).
3. Golubev A.Y. and Seletskiy A.V. *K voprosu o vybore modeli grunta dlia geotekhnicheskikh raschetov* [On the choice of soil model for geotechnical calculations]. *Aktualnyye nauchno-tekhnicheskiye problemy sovremennoy geotekhniki* [Current scientific and technical problems of modern geotechnics]. Tom 2. SPb.: SPbHASU Publ., 2009, pp. 6–10. ( in Russian).
4. Znamenskiy V.V., Ruzayev A.M. and Polynkov Y.N. *Sravneniye rezultatov naturnykh eksperymentov s raschetami, vypolnennymi pri pomoshchi konechno-elementnoy programmy Plaxis 3D Foundation dlia zabivnykh svay v glinistykh gruntakh* [Comparison of the results of full-scale experiments with calculations performed with the finite element program Plaxis 3D Foundation for driven piles in clay soils]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture] – Moscow, 2008, no. 2, pp. 18-23. ( in Russian).
5. Brinkgreve R.B.J. and Swolf W.M. *Rukovodstvo polzovatel'ia PLAXIS 3D Foundation. Versiia 2* [PLAXIS 3D Foundation User Guide. Version 2]: – Sankt-Peterburg: NIP-Informatika Publ., 2007. ( in Russian).
6. Sedin V.L., Bikus E.M. and Kovba V.V. *Primeneniye modeli uprochniaushchegosia grunta v chislenom modelirovanii buroinetsionnoy svai bolshogo diametra* [Application of the hardening soil model for numerical simulation of a continuous flight auger pile having large diameter] *Geotekhnika* [Geotechnics], 2014, no.3, pp.32-40. (in Russian).
7. Strokova L. A. *Opredeleniye parametrov dlia chislenogo modelirovaniia gruntov* [Determination of parameters for numerical modeling of soils] *Izvestiia Tomskogo Politekhnikeskogo universiteta*. [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University] 2008, Vol. 313, no. 1, pp. 69–74. (in Russian).
8. Ter-Martyrosian A.Z., Mirnyy A.Yu., Sidorov V.V. and Sobolev E.S. *Opredeleniye parametrov modeli Hardening Soil po rezultatam laboratornykh ispytaniy* [Determination of the parameters of the Hardening Soil model based on the results of laboratory tests]. *Geotekhnika. Teoriia i praktika. Obshcherossiyskaia konferentsiia molodykh uchenykh, nauchnykh sotrudnikov i spetsialistov: mezhvuzovskiy tematicheskii sbornik trudov* [Geotechnics. Theory and practice. All-Russian conference of young scientists, researchers and specialists: interuniversity thematic collection of works]. SPb.:SPbHASU, 2013, pp. 141–146. (in Russian).
9. Barla Marco and Barla Giovanni. *Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling*. *Geomechanics and Tunelling*. 2012. Vol. 3. Pp.214–232.
10. Truty A. and Obrzud R. *Improved formulation of the hardening soil model in the context of modeling the undrained behavior of cohesive soils*. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 37, No. 2, 2015.