

Числове моделювання польових штампових випробувань, вплив граничних умов ґрунтового масиву на осідання штампів при моделюванні

Ігор Бойко¹, Сергій Чечельницький²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури

31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

¹boyko40@ukr.net, orcid.org/ 0000-0002-6841-0271

²chechelnitskyi@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7879-1269

DOI: 10.32347/0475-1132.39.2019.65-73

Анотація. Досліджено вплив геометричних розмірів розрахункової області ґрунтового масиву на осідання штампів в глинистих ґрунтах. Визначено співвідношення між розмірами ґрунтового масиву в плані та по глибині. Встановлені співвідношення між розмірами ґрунтового масиву та розмірами штампів. А також, досліджено як впливає на осідання штампів його положення. Для цього було змодельовано декілька ситуацій. Одна із таких ситуацій це коли натурні випробування виконуються на поверхні ґрунту. Відповідно до цієї умови наша перша задача – це скінченно-елементна модель з розташуванням штампів на поверхні ґрунтового масиву. Інша ситуація коли штампіві випробування виконують у шурфі. Відповідно до цієї умови наша друга задача – це скінченно-елементна модель з розташуванням штампів у шурфі. Приведені результати польових штампових випробування глини напівтвердої в шурфі будівельного котловану. Абсолютна відмітка дна котловану 114.3, а абсолютна відмітка дна шурфу 110.0. Випробування були проведені на одному із будівельних майданчиків житлово-офісного комплексу в м. Києві. А також наведена принципова схема установки цих штампових випробувань та схема штампових випробувань з прив'язкою до геологічного розрізу, та графік залежності осідання штампів від питомого тиску. В роботі виконано порівняння результатів числового моделювання з натурними випробуваннями. Це представлено у вигляді таблиць та графіків. В зв'язку з великою кількістю отриманих результатів розрахунку. Для їх систематизації у таблицях представлені значення осідання штампів для останнього ступеня навантаження. А на графіках представлені результати числового моделювання для всіх сту-



Ігор Бойко
завідувач кафедри
геотехніки
д.т.н., проф.



Сергій Чечельницький
Аспірант кафедри
геотехніки

пенів навантаження. В той же момент було відображені лише графіки для характерних співвідношень розмірів ґрунтового масиву.

Ключові слова. Числове моделювання штампових випробувань, експериментальні штампіві випробування, осідання, критерій міцності Кулона-Мора, ґрунтовий масив.

ВСТУП

Сучасне проектування вже важко уявити без використання числових методів розрахунку, реалізованих в програмних комплексах. Відомо що при проектуванні фундаментів будівель та споруд, в першу чергу проектувальників цікавить геологія будівельного майданчика і тип будівлі. Знаючи цю інформацію вже можна припустити який тип фундаменту доцільніше використати. Для остаточного вибору виконують розрахунок декількох варіантів. За результатами розрахунку оцінюють техніко-економічні показники для кожного з них та приймається рішення. В даний час для розрахунків широко використовують числові моделі. Вони відрізняються функціональними можливостями, бібліотеками кінцевих елементів та орієнтацією на певний клас задач. В їх основі лежать моделі ґрунтових основ та матеріалів конструкцій. В залежності від типу моделі матеріалу кількість введених параметрів змінюється від 3-х при пружній поведінці матеріалу і до 18-ти при не пружній поведінці матеріалу.

МЕТА ТА МЕТОДИ РОБОТИ

Мета. Визначення розмірів ґрунтового масиву, які суттєво впливають на осідання штампу.

Метод. Дослідження впливу розмірів ґрунтового масиву на осідання штампу шляхом числового моделювання з використанням критерія міцності ґрунту Кулона-Мора.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

На одному із будівельних майданчиків житлово-офісного комплексу в м. Києві, були виконані штампові випробування, [1] для уточнення значення модуля загальної деформації ґрунту. Далі було виконане числове моделювання цих випробувань та проведено порівняння з експериментом.

Штампові випробування виконувалися в шурфі будівельного котловану. Абсолютна відмітка дна шурфу 110. Згідно інженерно

геологічного звіту шари основи відносяться до київського горизонту еоцену і включає суглинок напівтвердий і глину напівтверду. Випробування штампом, складалося з таких основних операцій:

- установка штампу на ґрунт;
- попереднє ущільнення ґрунту навантаженням рівним природному тиску на відмітці підшви штампу;
- навантаження штампа послідовним ступеннями (25кН; 93, 8кН; 150кН; 200 кН; 250 кН; 300 кН; 350 кН);
- замір та запис проміжних та кінцевих значень осадки на кожному ступені навантаження;
- розвантаження штампу ступенями рівним по величині ступеням навантаження;

Принципові схеми влаштування робіт зображені на рис.1 -3

В досліді використовувався жорсткий металевий штамп круглої форми діаметром $d=0.8\text{м}$ з плоскою підшвою площею $F = 5000\text{см}^2$. [2]

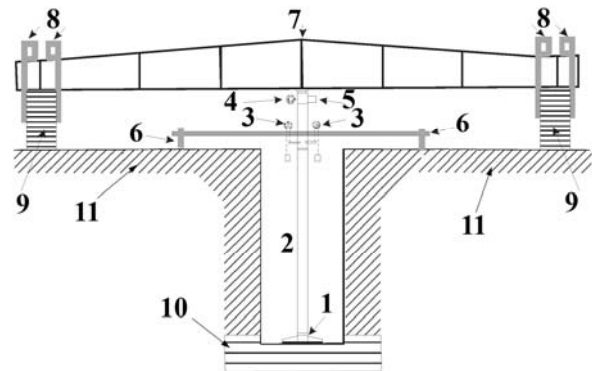


Рис.1. Принципова схема установки штампових випробувань; 1-штамп; 2-колона труб; 3 –прогиномір; 4-манометр; 5-гідравлічний домкрат; 6-реперна система; 7-несуча балка; 8-поперечні анкерні балки; 9-барретта; 10-глина; 11-суглинок.[2]

Fig.1. Schematic diagram of the stamp tests installation; 1-stamp; 2-pipes column; 3- flexometer; 4-pressure gauge; 5-hydraulic jack; 6-reference system; 7-bearing beam; 8-cross anchor beams; 9-barretta; 10-clay; 11-loam.



Рис.2. Фото загального виду надземної частини установки штампових випробувань. [2]

Fig.2. General photo of the above-ground part of the stamp tests installation.

Модуль деформації ґрунту E , МПа за результатами випробувань штампом визначали відповідно до п.5.5.2 [3] за формулою:

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, який приймається 0,42 – для глини;

K_p – коефіцієнт, який приймають рівним 1 при випробуваннях у котлованах, шурфах;

K_1 – коефіцієнт, який приймають 0,79 для жорсткого круглого штампа;

D – діаметр штампа, см;

ΔP – приріст тиску на штамп, МПа, який дорівнює $p_n - p_0$;

ΔS – приріст осідання штампа, що відповідає ΔP , см.

Опис скінчено елементної розрахункової моделі.

Підбір сітки скінченно елементної моделі виконувався з використанням збіжності результатів за осіданням штампу. Перевірку практичної збіжності варто виконувати на прикладах, близьких до цікавлячих проєктувальника класу задач. [4] Виконувалося моделювання кругло штампу $d=0.8\text{м}$ у вигляді 3-х та 4-х вузлових пластин що відповідає площі підшви штампу $F = 5000\text{см}^2$ ($E = 2 \cdot 10^7 \text{т/м}^2$). Даний штамп був опертий на ґрунтовий масив розміром $2\text{х}2\text{х}2\text{м}$,

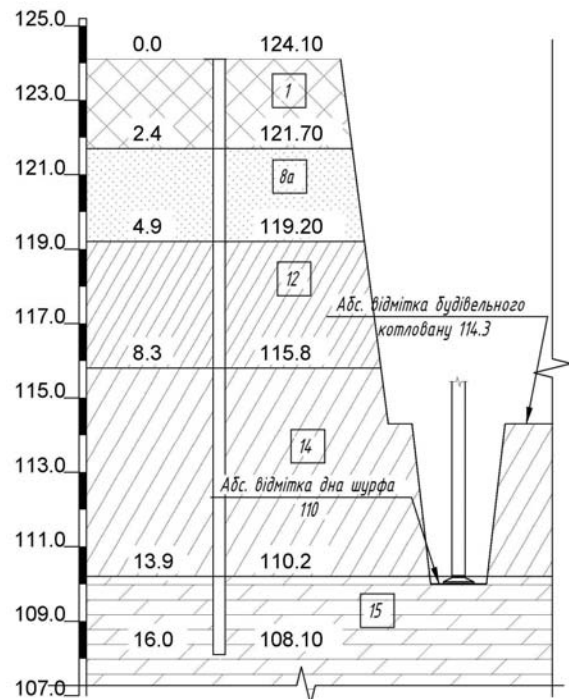


Рис.3.Схема штампових випробувань з прив'язкою до геологічного розрізу (ІГЕ 1 -насіпний ґрунт - щебінь, пісок з будівельним сміттям, темно сірий; ІГЕ 8а - переміщений ґрунт - пісок мілкий, глинистий, жовто-бурий, з прошарками світлого; ІГЕ 12 - Суглинок зеленувато - сірий, піщанистий, слюди́стий, тугопластичним; ІГЕ 14 - Суглинок (наглинок) зеленувато-сірий, слюди́стий тугопластичний - до напівтвердого; ІГЕ 15 - Глина мергельна голубувато-сіра, світло-сіра, місцями з прошарками глауконітового піску, місцями тріщинувата, тверда, напівтверда).

Fig.3. Scheme of stamp tests with reference to the geological section (IGE 1-bulk soil - crushed stone, sand with construction debris, dark gray; IGE 8A - moved soil - fine sand, clay, yellow-brown, with layers of light; IGE 12 - Loam greenish - gray, sandy, micaceous, refractory; IGE 14 - Loam, greenish-gray, micaceous, refractory to semihard; IgE 15 - marl clay bluish-gray, light gray, sometimes with layers of glauconite sand, sometimes fractured, hard, semihard).

завантажений рівномірно розподіленим навантаженням по всій площі. Виконувався підбір товщини штампу, в результаті для чисельного моделювання було вибрано товщину штампу рівну 5см. для забезпечення жорсткості. Ґрунтовий масив моде-

лювався 8-ми та 6-ти вузловими об'ємними скінченними елементами.

Розрахунок виконувався при шести сітках скінчених елементів 2x2 (1м); 4x4(0.5м);8x8(0.25м); 16x16(0.125м); 32x32 (0,0625м); 64x64 (0,03125м). Результати цих розрахунків представлені в таблиці 1.

Табл. 1. Збіжність результатів
Table 1. The convergence of the results

Розмір скінченого елемента, м	Розмір сітки	Кількість елементів	Осідання в центрі, мм	$\Delta, \%$
1	2x2x2	60	3,6	
0,5	4x4x4	188	5,1	28,9
0,25	8x8x8	692	5,9	14,3
0,125	16x16x16	4548	6,2	4,8
0,0625	32x32x32	34534	6,6	4,7
0,03125	64x64x64	267580	6,7	2,0

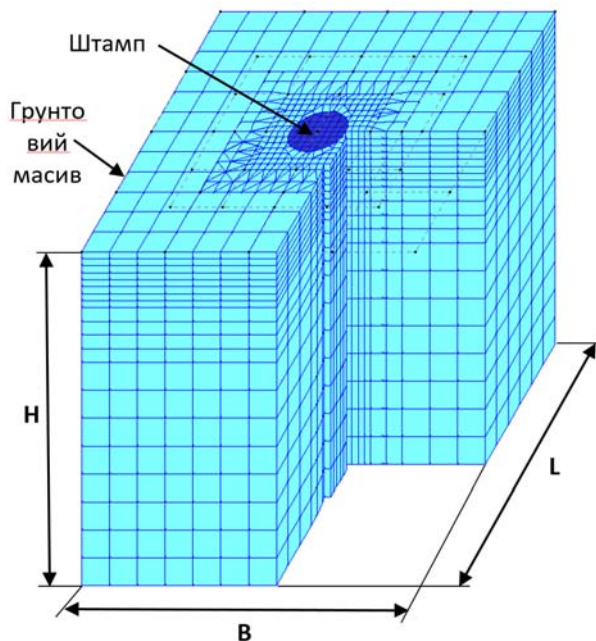


Рис.4.Скінченно-елементна модель штампових випробувань з розташуванням штампу на поверхні ґрунтового масиву.

Fig.4. Finite element stamp tests model with the location of the stamp on the surface of the soil mass.

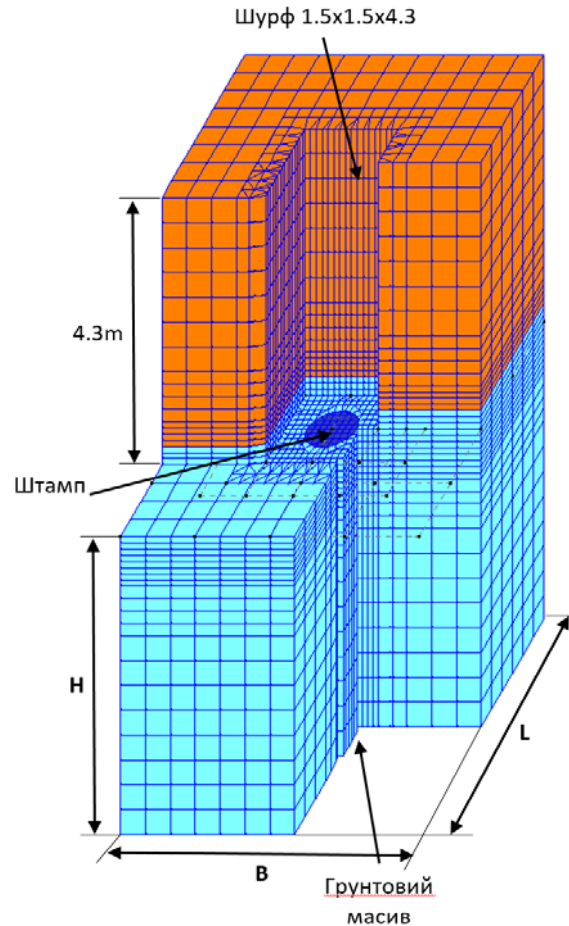


Рис.5.Скінченно-елементна модель штампових випробувань з розташуванням штампу у шурфі

Fig.5. Finite element stamp tests model with the location of the stamp in the pit.

Для подальшого розрахунку було вибрано сітку 16x16x16 з розміром скінченого елемента 0.125м. Скінченно-елементна модель штампових випробувань з розташуванням штампу на поверхні ґрунтового масиву представлена на рисунку 4. та з розташуванням штампу у шурфі на рисунку 5.

Для моделювання ґрунту використовувалися параметри з інженерно-геологічного звіту:

- модуль загальної деформації , E
- коефіцієнт Пуассона, ν
- питоме зчеплення, c
- кут внутрішнього тертя, ϕ
- питома вага ґрунту, γ

Числові значення які використовувалися при моделювання ґрунтового масиву, для ІГЕ 14 – суглинок зеленувато-сірий, слюдистий тугопластичний - до напівтвердого

$E=24\text{МПа}$; $\nu=0.35$; $c=33\text{кПа}$; $\varphi=21^{\circ}$;
 $\gamma=1.92\text{т/м}^3$, відповідно для ПЕ 15 – глина
 голубувато-сіра, світло-сіра, місцями з
 прошарками глауконітового піску, міс-
 цями тріщинувата, тверда, напівтверда
 $E=30\text{МПа}$; $\nu=0.4$; $c=63\text{кПа}$; $\varphi=17^{\circ}$;
 $\gamma=1.94\text{т/м}^3$.

Спочатку досліджувався вплив зміни
 всіх розмірів ґрунтового масиву на осідан-
 ня штамп. Початковий розмір ґрунтового
 масиву дорівнював $B=L=H=2d=1.6\text{м}$, де d –
 діаметр штамп який дорівнює 0.8м . і
 останній розмір ґрунтового масиву склав
 $B=L=H=16d=12.8\text{м}$. Подальше збільшення
 розмірів ґрунтового масиву немало сенсу,
 так як різниця осідання штамп при розмірі
 ґрунтового масиву $12d$ і $16d$ становила ме-
 нше 2%, для поверхневого штамп і взагалі
 ніякої різниці для штамп у шурфі.

Результати розрахунку показали що для
 штамп який знаходиться на поверхні ґрун-
 тового масиву, збільшення всіх розмірів
 ґрунтового масиву в 1,5 рази, призводить

до збільшення осідання штамп на 16%, у
 випадку збільшення розмірів ґрунтового
 масиву у 3 рази осідання штамп збільши-
 лося на 35%, відповідно у 6 разів на
 43,89%; у 8 разів на 45,10%. Як ми бачимо
 різниця між попередніми розмірами та на-
 ступними зменшується, так само різниця
 між експериментом і моделюванням. Для
 штамп у шурфі після збільшення розмірів
 ґрунтового масиву в 2 рази, подальше збі-
 льшення розмірів не впливає на осідання
 штамп. Результати розрахунку представ-
 лені в таблиці 2. В ній. Перша колонка це
 поступова зміна всіх розмірів ґрунтового
 масиву. Друга та п'ята колонка відображає
 осідання штамп. Третя і шоста колонка це
 приріст осідання штамп. Четверта і сьома
 колонка це різниця між експериментом і
 числовим моделюванням. Восьма колонка
 різниця між задачею коли штамп на поверхні
 ґрунтового масиву та штампом у шурфі.

Табл. 2. Результати розрахунку при зміні розмірів ґрунтового масиву при умові $B=L=H$
 Table 2. Calculation results for changing the size of the soil mass under the condition $B=L=H$

Розмір ґрунтового ма- сиву	Задача №1 Штамп на поверхні			Задача №2 Штамп у шурфі			Δ осідання між задачами, %
	Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ між експеримен- том та моделюван- ням, %	Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ між експеримен- том та моделюван- ням, %	
$B=L=H$	2	3	4	5	6	7	8
$2d=1.6\text{м}$	8.27	-	39.19	7.73	-	43.16	6.53
$3d=2.4\text{м}$	9.62	16.32	29.26	8.5	9.96	37.50	11.64
$4d=3.2\text{м}$	10.6	28.17	22.06	9.04	16.95	33.53	14.72
$5d=4\text{м}$	11	33.01	19.12	9.06	17.21	33.38	17.64
$6d=4.8\text{м}$	11.2	35.43	17.65	9.07	17.34	33.31	19.02
$8d=6.4\text{м}$	11.5	39.06	15.44	9.01	16.56	33.75	21.65
$12d=9.6\text{м}$	11.9	43.89	12.50	8.99	16.30	33.90	24.45
$16d=12.8\text{м}$	12	45.10	11.76	8.99	16.30	33.90	25.08

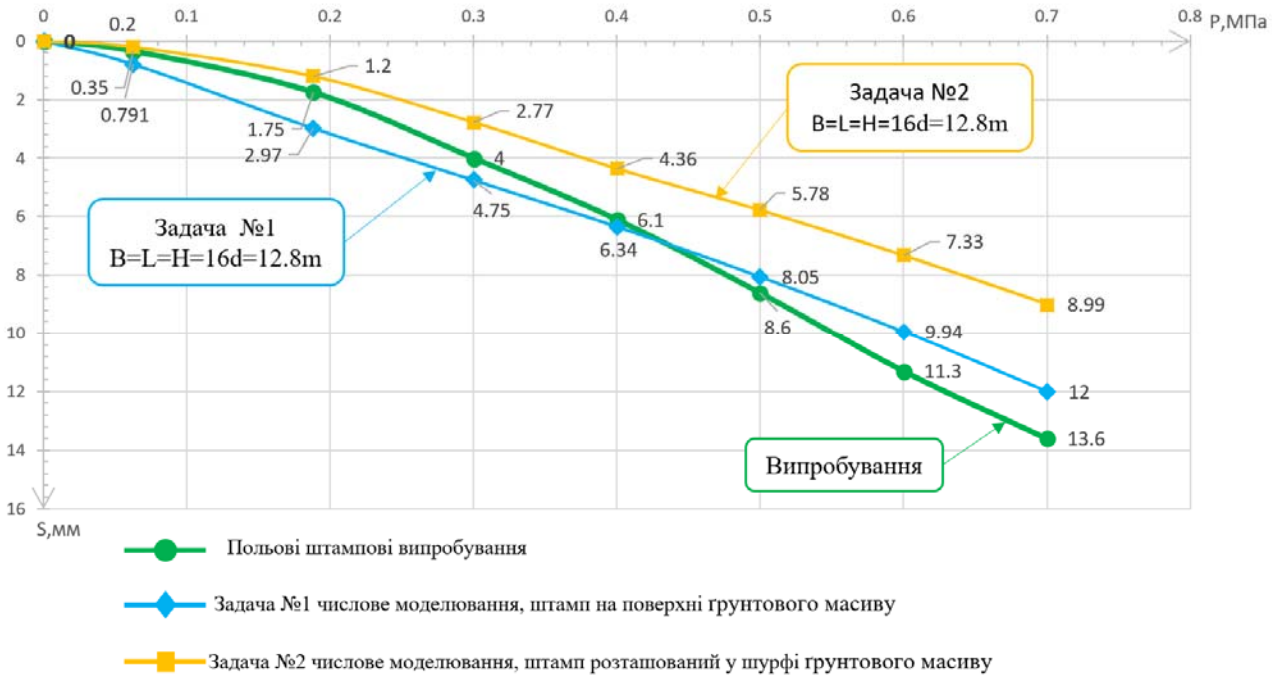


Рис.6. Графік залежності осідання штампів від питомого тиску $S=f(P)$
 Fig.6. Graph of the stamp precipitation dependence on the specific pressure $S=f(P)$.

На рисунку 6 представлений графік залежності осідання штампів від питомого тиску $S=f(P)$. На ньому представлений графік польових штампів випробування та числового моделювання для поверхневого штампів з розмірами ґрунтового масиву $V=L=H=16d=12.8\text{m}$, та графік числового моделювання для штампів заглибленого у шурфі з такими ж розмірами. З графіку видно що числова модель для штампів розташованому у шурфі завищує показники по несучій здатності основи. З іншої моделі ми бачимо що до тиску 0,4 МПа ми має завищені значення, а далі занижені показники. Різниця між задачами при таких розмірах ґрунтового масиву складає 25%

На наступному етапі виконувалася зміна розмірів ґрунтового масиву в плані. Отримані результати показали що приріст осідання від збільшення розмірів ґрунтового масиву у плані не перевищує 5%. В таблиці 3 представлені результати розрахунків при різних розмірах. В колонці дев'ять при однакових розмірах ґрунтового масиву показана різниця між задачею 1 коли штамп моделюється на поверхні ґрунту та зада-

чею 2 коли штамп моделюється у шурфі. На наступному етапі виконувалися зміна розмірів ґрунтового масиву по глибині. З результатів розрахунку видно що при збільшенні глибини в два рази осідання збільшується на 18%, а при збільшенні глибини ґрунтового масиву в три рази осідання збільшується на 35%. І така тенденція характерна для обох задач. На рисунку 7 представлений графік залежності осідання штампів від питомого тиску $S=f(P)$. На ньому представлений графік польових штампів випробування, графік числового моделювання для поверхневого штампів з розмірами ґрунтового масиву $V=L=4d=3.2\text{m}$, та графік числового моделювання для штампів заглибленого у шурфі з такими ж розмірами. З графіку видно що числова модель для штампів розташованому у шурфі має високу збіжність з експериментальними випробуваннями. Числова модель з штампом на поверхні ґрунтового масиву на всьому графіку відображає запас міцності основи. При однакових розмірах ґрунтового масиву різниця між задачами складає 15%. Результати розрахунків представлені в Таблиці 4.

Табл. 3. Результати розрахунку при зміні розмірів ґрунтового масиву при умові $B=L$ зміні, а H стала.

Table 3. Calculation results for changing the size of the soil mass under the condition $B=L$ variable, H - constant

Розмір ґрунтового масиву		Задача №1			Задача №2			Δ осідання між задачами, %
		Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ осідання між експериментом та моделюванням, %	Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ осідання між експериментом та моделюванням, %	
$B=L$	H	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4d=3.2м	4d=3.2м	10.6	-	22.06	9.04	-	33.53	14.72
6d=4.8м		10.8	1.89	20.59	8.7	3.76	36.03	19.44
8d=6.4м		11	3.77	19.12	8.6	4.87	36.76	21.82
10d=8м		11.1	4.72	18.38	8.58	4.99	36.91	22.70
12d=9.6м		11.1	4.72	18.38	8.59	4.98	36.84	22.61
15d=12м		11.1	4.72	18.38	8.6	4.87	36.76	22.52
16d=12.8м		11.1	4.72	18.38	8.6	4.87	36.76	22.52

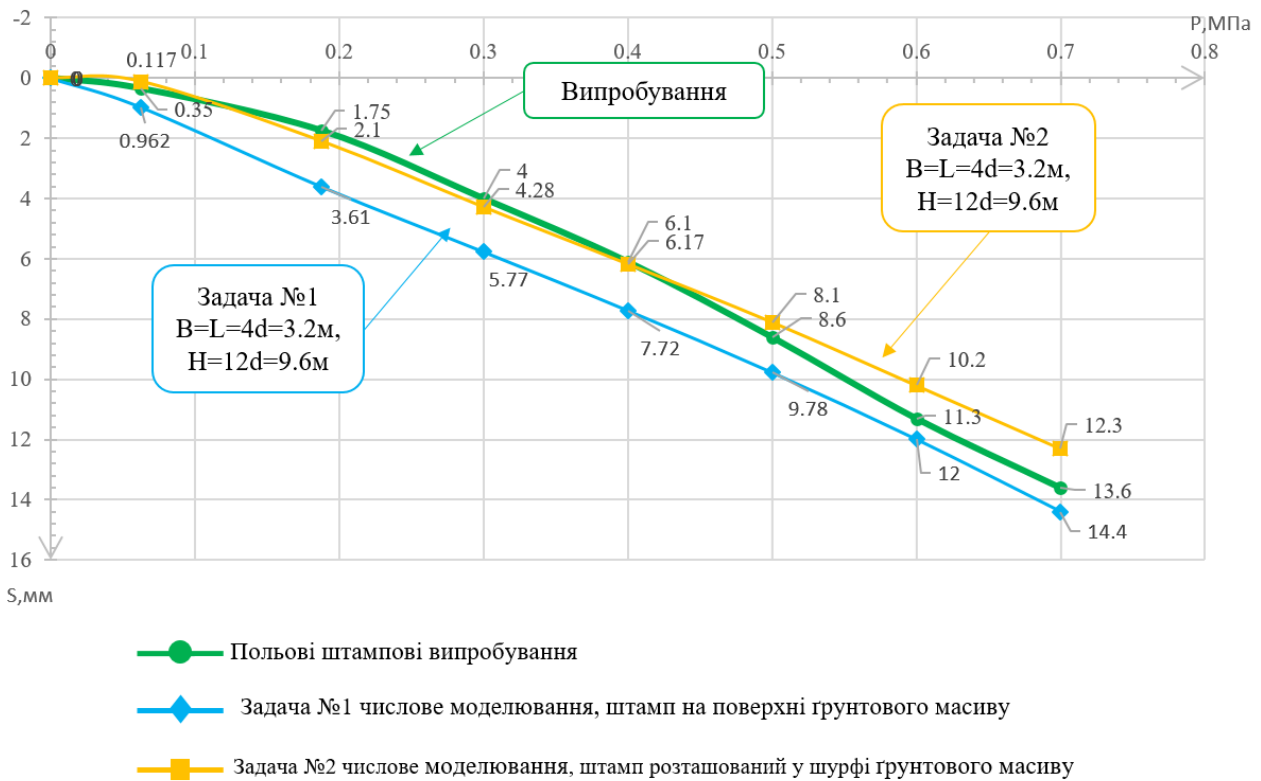


Рис.7. Графік залежності осідання штампку від питомого тиску $S=f(P)$

Fig.7. Graph of the stamp precipitation dependence on the specific pressure $S=f(P)$.

Табл. 4. Результати розрахунку при зміні розмірів ґрунтового масиву при сталих розмірах $B=L$ та H - змінаTable 4. Calculation results for changing the size of the soil mass at constant sizes $B=L$ and H variable.

Розмір ґрунтового масиву		Задача №1 Штамп на поверхні			Задача №2 штамп у шурфі			Δ осідання між задачами, %
		Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ осідання між експериментом та моделюванням, %	Осідання в центрі, мм	Приріст осідання, %	Δ осідання між експериментом та моделюванням, %	
$B=L$	H							
т	2	3	4	5	6	7	8	9
4d=3.2м	4d=3.2м	10.6	-	22.06	9.04	-	33.53	14.72
	8d=6.4м	12.5	17.92	8.09	10.7	18.36	21.32	14.40
	10d=8м	13.5	27.36	0.74	11.5	27.21	15.44	14.81
	12d=9.6м	14.4	35.85	5.88	12.3	36.06	9.56	14.58
	14d=11.2м	15.4	45.28	13.24	13.1	44.91	3.68	14.94
	16d=12.8м	16.3	53.77	19.85	14	54.87	2.94	14.11

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

ЛІТЕРАТУРА

1. Встановлено, що на осідання штампа суттєвий вплив має зміна розмірів ґрунтового масиву по глибині, ніж зміна розмірів в плані. Так, при збільшенні глибини ґрунтового масиву в два рази, осідання збільшилося на 18%, а при збільшенні в 2 рази розмірів ґрунтового масиву в плані, осідання збільшилося всього лиш на 4%.

2. Порівняння даних осідання штампів показало, що осідання поверхневого штампу більше за осідання заглибленого штампу на 15%, при однакових розмірах ґрунтового масиву.

3. Числове моделювання штампа розташованого у шурфі при умові що розміри ґрунтового масиву в плані, в 4 рази більші за розмір штампу та в 4 рази менші за глибину ґрунтового масиву, то різниця з експериментом становить менше 3%.

1. Корнієнко М.В. Комплексна оцінка визначення модуля деформації ґрунту польовими та лабораторними методами / М.В. Корнієнко, О.В. Язвінський, С.В. Поклонський // *Будівельні конструкції*. - 2013. - Вип. 79. - С. 72-79.
2. Инженерно-геологические испытания штампом на площадке строительства жилищно-офисного комплекса по ул. Глыбочицкой, 43, в шевченковском районе г. Киева: отчет. Киев: ООО «ГЕОЕКСПЕРТ», 2008. 28 с.
3. ДСТУ Б.В. 2.1-7:2000(ГОСТ 20276-99). ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності і деформативності. К., Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2001. 81 с.
4. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа/ А.В. Перельмутер., В.И. Сливкер. – Киев, Изд-во «Сталь», 2002. – 600с.:ил.
5. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов /Пер. с англ. А.С.Алексеева и др.; Под ред. А.Ф. Смирнова. – М.:Стройиздат, 1982 – 448 с.,

ил. – Перевод изд.: Numerical methods in finite element analysis /К. – J.Bathe, E.L.Wilson(1976).

REFERENCES

6. Korniienko M. V. Yazvinskyi O.V. Poklonskyi S.V. (2013) Kompleksna otsinka vyznachennia moduliu deformatsii hruntu polovymy ta laboratornymy metodamy [Comprehensive evaluation of determining the soil deformation modulus using field and laboratory methods]. *Budivelni konstruksii*, 79, 72-79. (In Ukrainian).
7. Ynzhenerno-heolohycheskye yspytanyia shtampom na ploshchadke stroytelstva zhylyshchno-ofysnoho kompleksa po ul. Hlybochytskoi, 43, v Shevchenkovskom raione h. Kieva: otchet. Kiev: (2008) [Engineering and geological tests with a stamp at the construction site of a housing and office complex at 43 Hlybochitskaya street, in the Shevchenko district of Kyiv]. ООО “HEOEKSPERT”, 28. (In Russian).
8. Hrunty. Metody polovoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformatyvnosti: DSTU B.V. 2.1-7:2000(HOST 20276-99). (2001) [Soils. Methods for field determination of strength and deformability characteristics.], Kyiv: Derzhavnyi komitet budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovoi polityky Ukrainy, 81. (In Ukrainian).
9. Perelmuter A.V., Slyvker V.Y. (2002) Raschetnye modeli sooruzhenyi y vozmozhnost ykh analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis] . Kiev, Yzd-vo «Stal», 600. (In Russian)
10. Bathe J., Wilson E.L. (1982). Chyslennyye metody analiza y metod konechnykh elementov [Numerical methods in finite element analysis] Per. s anhl. A.S.Alekseeva y dr.; Pod red. A.F. Smyrnova. Moskva, Stroiizdat, 448. (In Russian).

Numerical modeling of field stamp tests, the influence of boundary conditions of the soil massif on the settlement of the stamp during modeling.

*Igor Boyko,
Serhii Chechelnytskyi*

Summary. The influence of the geometric dimensions of the calculated area of the soil mass on the stamp settlement in clay soils is studied. The ratio between the size of the soil mass in the plan and by depth is determined. The relationship between the size of the soil mass and the size of the stamp is established. And also, it is investigated how its position affects the settlement of the stamp. Several situations were simulated for this purpose. One of these situations is when full-scale tests are performed on the soil surface. According to this condition, our first task is a finite element model with the stamp location on the surface of the soil mass. Another situation is when stamp tests are performed in the pit. According to this condition, our second task is a finite element model with the stamp location in the pit. The results of field stamp tests of bluish-gray, semi-solid clay in the pit of a construction foundation ditch are presented. The absolute mark of the foundation ditch bottom is 114.3, and the absolute mark of the pit bottom is 110. The tests were carried out at one of the construction sites of the housing and office complex in Kyiv. A schematic diagram of the installation of these stamp tests and the scheme of stamp tests with reference to the geological section, and a graph of the dependence of the stamp precipitation on the specific pressure are also provided. The paper compares the results of numerical simulation with full-scale tests. This is presented in the form of tables and graphs. Due to the large number of calculation results obtained. To systematize them, the tables show the values of the stamp precipitation for the last load stage. And the graphs show the results of numerical modeling for all degrees of load. At the same time, only graphs for characteristic ratios of the soil massif size were displayed.

Key words. Numerical simulation of stamp tests, experimental stamp tests, settlement, the Mohr-Coulomb failure criterion, soil massif.