

*В.Л. Підлуцький, к.т.н., доцент
Київський національний університет
будівництва та архітектури*

ВПЛИВ КРАЙОВИХ УМОВ НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ У ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ВИСОТНИХ БУДИНКІВ

Досліджено перерозподіл зусиль у фундаментних конструкціях висотних будинків залежно від урахування крайових умов у розрахунковій схемі за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів. При цьому встановлено, що у процесі спорудження висотних будинків в умовах щільної міської забудови з улаштуванням глибоких котлованів необхідно враховувати в розрахунках разом з реальним ґрунтовим масивом усі інженерні споруди і захисні конструкції. Внутрішні зусилля у фундаментних плитах можуть змінювати в окремих зонах знак, зусилля в палях змінюються до 20%. Також доведено, що крайові умови впливають на напружено-деформований стан системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції».

Ключові слова: висотний будинок, підпірна стіна, крайові умови, чисельне моделювання, пальовий фундамент.

*В.Л. Подлуцкий, к.т.н., доцент
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры*

ВЛИЯНИЕ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ФУНДАМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВИСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Исследовано перераспределение усилий в фундаментных конструкциях высотных домов в зависимости от учета крайевых условий в расчетной схеме с помощью численного моделирования методом конечных элементов. При этом установлено, что в процессе строительства высотных зданий в условиях плотной городской застройки с устройством глубоких котлованов необходимо учитывать в расчетах вместе с реальным грунтовым массивом все инженерные сооружения и защитные конструкции. Внутренние усилия в фундаментных плитах могут изменять в отдельных зонах знак, усилия в сваях меняются до 20%. Также доказано, что крайевые условия влияют на напряженно-деформированное состояние системы «основание – инженерные конструкции – фундамент – надземные конструкции».

Ключевые слова: высотное здание, подпорная стена, крайевые условия, численное моделирование, свайный фундамент.

INFLUENCE OF EDGE CONDITIONS FOR REDISTRIBUTION EFFORTS IN FOUNDATION CONSTRUCTION OF HIGH-RISE BUILDINGS

Investigated the efforts redistribution in multistorey buildings foundation construction depending of boundary conditions account using finite element numerical modeling method in the calculation scheme. It has been established that during the construction of multistorey buildings in urban construction conditions with deep foundation pits arrangement should be considered in real soil file calculations with all engineering constructions and protective constructions. Internal efforts in the foundation plates can be changed in some zones efforts in the piles vary up to 20% mark. It is also proved that boundary conditions are affected on stress-strain state of the «base - engineering construction - foundation - overground constructions».

Keywords: high-rise building, retaining wall, edge conditions, numerical simulation, pile foundation.

Вступ. Значна щільність міської забудови обмежує простір для зведення нових об'єктів. У зв'язку із цим, з одного боку, доводиться влаштовувати глибокі котловани для розміщення в них підземних приміщень, а з іншого – здійснювати інженерні заходи для захисту утворених котлованів та прилеглих територій. Тому в умовах сучасного будівництва спорудження висотних будинків досить часто супроводжується влаштуванням підпірних стін і захисних екранів. Саме в таких складних та різнобічних умовах проектувальнику необхідно створити надійні й комфортні площі для задоволення людських потреб. А це у свою чергу вимагає прийняття раціональних рішень з точки зору проектування та будівництва, а також розроблення коректної розрахункової схеми для розрахунку системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції» як єдиного цілого (рис. 1).

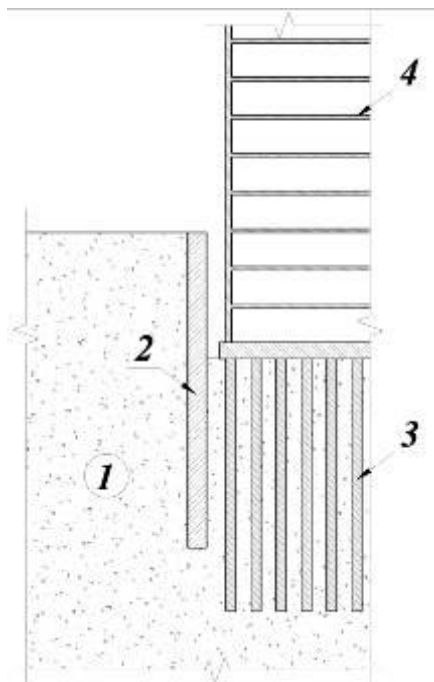


Рис. 1. Загальна схема розміщення конструктивних елементів висотного будинку при влаштуванні глибоких котлованів:

- 1) багат шаровий ґрунтовий масив;
- 2) підпірна стіна;
- 3) фундамент;
- 4) надземні конструкції

У цих умовах суттєво змінюється напружено-деформований стан (НДС) основи забудови, несучий шар якої розташований на значній глибині від поверхні. Висотні будівлі необхідно влаштовувати на пальових фундаментах з метою перерозподілу навантаження від надземних конструкцій на несучі шари ґрунтів основи, котрі залягають під слабкими верхніми шарами. Крім того, при освоєнні підземних площ улаштовуються глибокі котловани, які мають вплив на оточуючі будівлі та споруди. Коректність проектування полягає саме в раціональному врахуванні взаємодії існуючих об'єктів і тих, що проектуються.

Огляд останніх джерел досліджень та публікацій. Для проведення розрахунків фундаментів висотних будинків такого класу необхідно розробляти розрахункову схему, в якій ураховано інженерні конструкції й коректно задано крайові умови. Оточуючі захисні конструкції, поряд розташовані будівлі та споруди тощо визначають крайові умови при складанні розрахункової схеми будинків. Також потрібно враховувати наявність ґрунтового масиву як у межах, так і поза межами плями забудови. Ці факти неодноразово відмічені в багатьох роботах [1 – 7].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Досить часто на сьогоднішній час при проектуванні висотних будинків некоректно враховують крайові та наявні ґрунтові умови. Використовуючи модель коефіцієнтів жорсткості основи для опису деформування ґрунтового середовища [1 – 3, 8, 9], багато розрахункових комплексів не враховують дію оточуючого ґрунтового масиву, що може призводити до неточних результатів. Урахування ґрунтового масиву у вигляді об'ємних елементів вимагає досить потужної техніки, адже виникає велика кількість невідомих при розв'язку систем рівнянь.

Мета досліджень полягає у вивченні впливу зміни крайових умов на розподіл зусиль у фундаментних конструкціях, в обранні найбільш раціонального способу розрахунку будівлі та встановленні коректної розрахункової схеми (РС).

Постановка завдання. Під час розроблення розрахункової схеми при розрахунку системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції» важливим етапом є дослідження впливу крайових умов. Необхідною умовою є не тільки врахування ґрунтового масиву поза межами плями забудови, а й наявної підпірної стіни з масивом ґрунту за нею. Наявність чи відсутність огорожувальних конструкцій (підпірні стіни, захисні екрани тощо) диктує крайові умови при розрахунках вищевказаних систем і впливає на результати отриманих даних.

Швидкий розвиток науки й техніки дають змогу розв'язувати досить складні задачі механіки ґрунтів такого класу. Це дозволяє враховувати реальні ґрунтові умови й використовувати різні моделі деформування ґрунтового середовища [3, 4, 6, 7]. Урахування ґрунтового масиву певного розміру, в межах якого зводиться будинок, визначає крайові умови розрахункової схеми. На сьогодні відомі такі варіанти врахування крайових умов:

1) при використанні моделі коефіцієнтів жорсткості основи в місцях розташування паль прикладають жорсткі вставки з деякою піддатливістю (пружинки), ґрунтову товщу замінюють коефіцієнтами жорсткості [3, 4];

2) при врахуванні реального ґрунтового масиву з його реальними характеристиками та з представленням його у вигляді об'ємних елементів використовуються пружні й пружно-пластичні моделі деформування ґрунтового середовища [1, 4 – 8]:

– «традиційний» варіант – будинок, який зводиться в щільній міській забудові, розглядається ніби він будується «в полі», де відсутні будь-які сусідні будинки та споруди, при цьому наче стоїть на поверхні ґрунту. У такому випадку враховується ґрунт з однаковим віддаленням у всі сторони від будинку (рис. 2, а);

– «обмежений» варіант – урахування ґрунтового масиву за попередньою методикою, але в умовах захисту глибоких котлованів підпірними стінами в'язі накладають на грані підірних стін, обмежуючи при цьому ґрунтовий масив. У цьому випадку вважають, що за межами підірної стіни ґрунтова основа не деформується, оскільки дана конструкція є жорсткою спорудою з точки зору деформативності всіх елементів системи. Підпірна стіна ніби «відсікає» ґрунтовий масив (рис. 2, б).

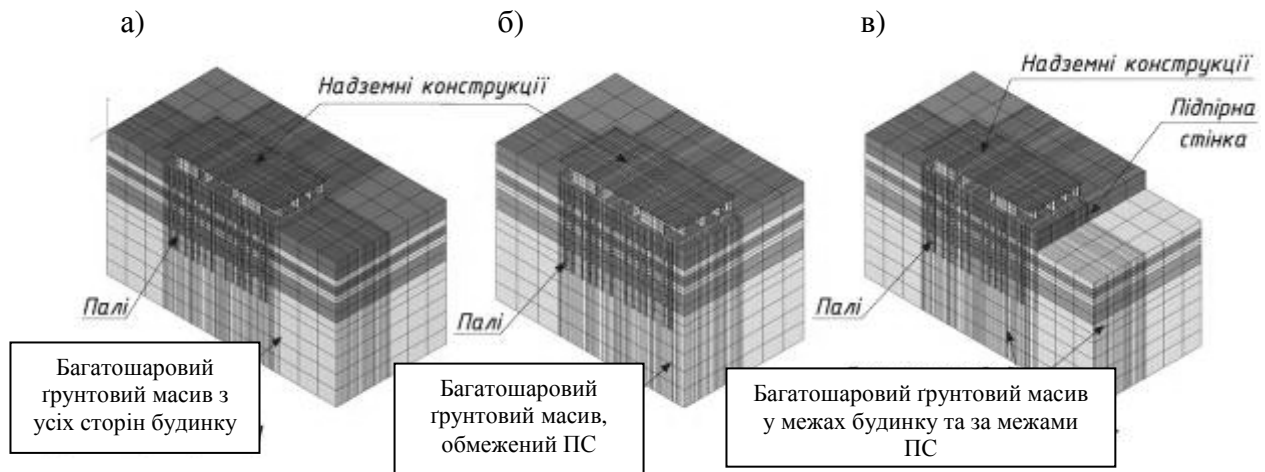
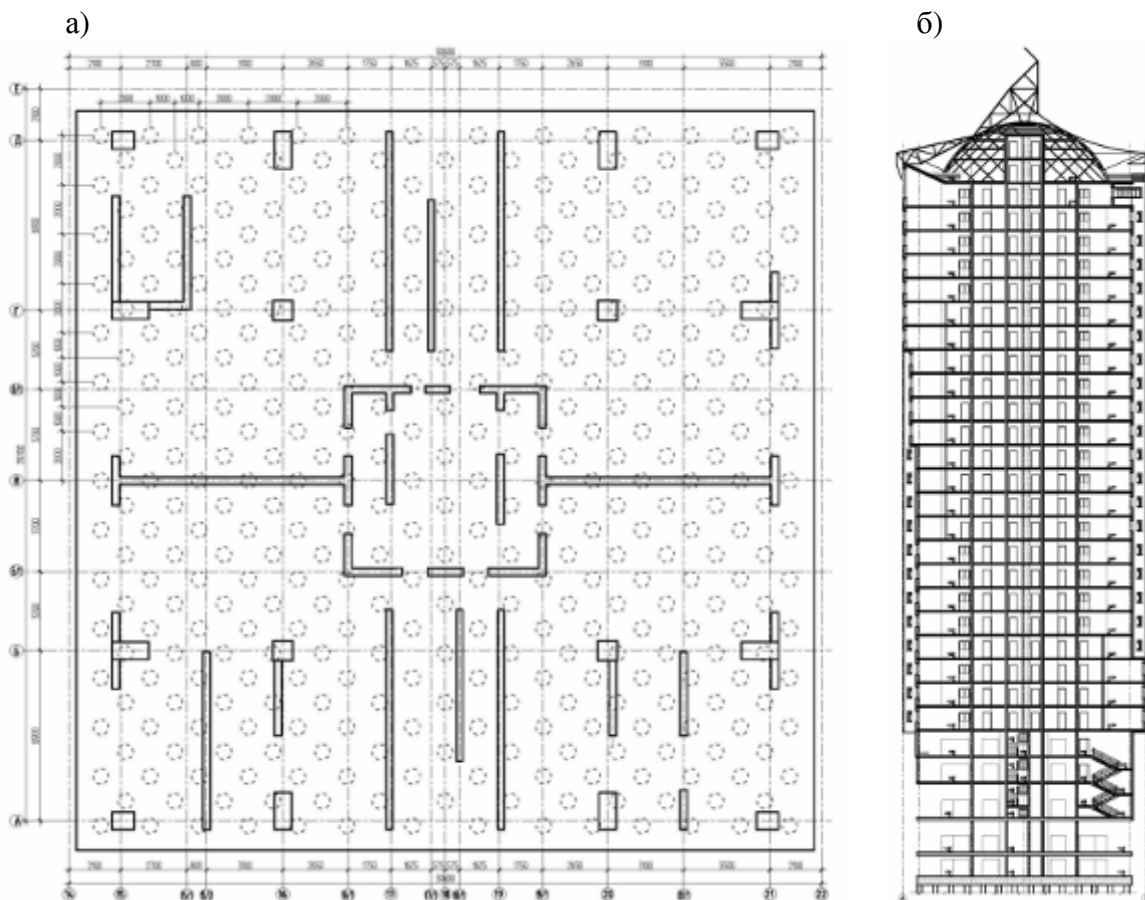


Рис. 2. Варіанти розрахункової схеми:
а) традиційний; б) обмежений; в) загальний

Наведені вище варіанти розрахункових схем запропоновано порівняти з варіантом, який урахує також і ґрунтовий масив за підпірною стінкою (рис. 2, в). Адже в умовах глибоких котлованів відбувається деформування всього ґрунтового масиву, що призводить до додаткових переміщень не тільки конструкцій висотних будинків, а й конструкцій захисних споруд. Такий варіант розрахункової схеми будемо називати «загальний». Очевидно, що при традиційному варіанті досягається простота врахування крайових умов – симетрично з усіх боків; при обмеженому – зменшується кількість невідомих, що скорочує час розв'язків задач; при загальному – враховуються всі сусідні споруди та особливості їх взаємодії, при цьому збільшується кількість невідомих і час розрахунків. Такі задачі стають обов'язковими при проектуванні сучасного будівництва мегаполісів в умовах щільної міської забудови.

Основний матеріал і результати. Необхідно звернути увагу на те, що на наведених варіантах розрахункових схем дослідного будинку на рис. 2 не показано всіх надземних конструкцій, хоча в розрахунках вони наявні. Це виконано для того, щоб наочно показати варіанти врахування ґрунтового масиву. У першому випадку ґрунтовий масив є з усіх боків будинку, в другому – з трьох сторін, а зі сторони підірної стіни накладені в'язі, у третьому – ґрунтовий масив також з усіх сторін, але ще задана конструкція підірної стіни.

Загальну скінченноелементну модель будинку зображено на рис. 4, у цьому дослідженні в ній змінювали наведені крайові умови. Також необхідно відмітити, що на рис. 2 і 4 показано лише половину будинку, розділеного віссю симетрії, з метою зображення всіх несучих елементів системи. Скінченноелементна модель розроблена на основі архітектурно-планувальних та конструктивних рішень висотного будинку, має 29 поверхів, у тому числі 2 поверхи офісних приміщень і 2-рівневий підземний паркінг, розміри в плані 29х29 м (рис. 3).



**Рис. 3. Конструктивні рішення висотного будинку:
а) план несучих конструкцій; б) розріз**

Будинок зводиться на багат шаровій ґрунтовій основі, верхні шари якої є слабкими з точки зору сприймання повного навантаження від будинку. Це викликало необхідність спорудження пальового фундаменту, який складається з буроін'єкційних паль, пов'язаних ростверком у вигляді залізобетонної плити товщиною 1,0 м. Палі прийняті довжиною 18,0 м діаметром 620 мм. Несучими конструкціями будинку, що утворюють жорсткий каркас, слугують залізобетонні монолітні конструкції (колони, пілони, стіни, ригелі, перекриття). Конструктивна схема будинку – каркасно-монолітна. План розташування несучих конструкцій будинку та розріз наведено на рис. 4.

У геоморфологічному відношенні будинок знаходиться у верхній частині лівого схилу долини р. Либідь, у місці переходу її (долини) у моренно-зандрову рівнину. Майданчик складений з піщаних та глинистих ґрунтів, детальне розташування яких наведено на інженерно-геологічному перерізі (рис. 5). Геологічну будову на цьому майданчику розвідано на глибину 50 м за допомогою буріння свердловин і статичним зондуванням. Основою паль слугують піски дрібні щільні водонасичені (ІГЕ-12а), які підстеляються пісками пилюватими щільними (ІГЕ-12) та середньої щільності (ІГЕ-13). Фізико-механічні властивості ґрунтів за даними інженерно-геологічних вишукувань наведено в табл. 1.

Розрахунки напружено-деформованого стану елементів системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції» виконувалися на розрахунковому комплексі «VESNA» в тривимірному просторі.

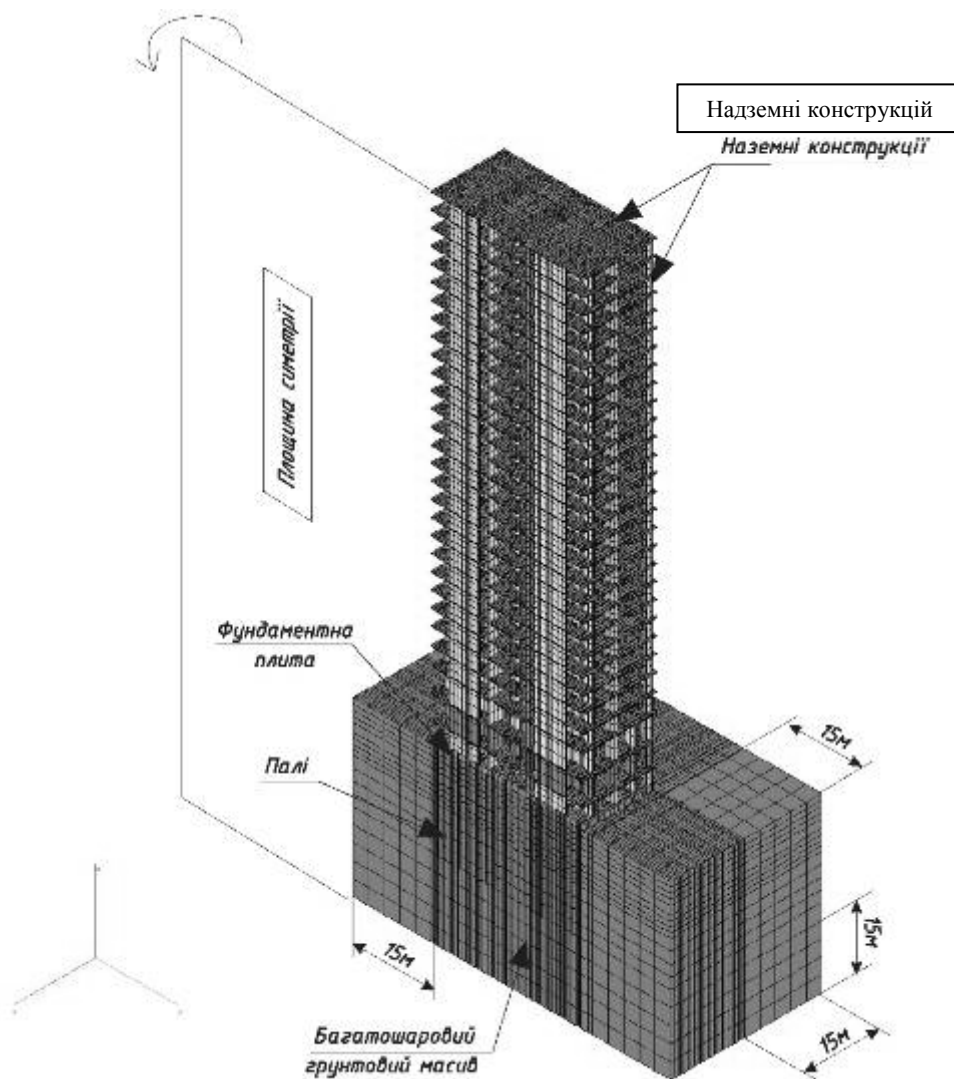


Рис. 4. Скінченоелементна модель висотного будинку

Дослідження та порівняння результатів розрахунків показують, що граничні умови впливають на напружено-деформований стан системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції».

Зусилля у головах кутових паль при «загальному» варіанті розрахункової схеми (РС) збільшуються до 15 – 20% порівняно з варіантом «обмеженого» врахування крайових умов (розрахункова схема без урахування оточуючого ґрунтового масиву за межами підпірної стіни). Значення цих результатів наведено на рис. 6.

Таким чином, змінюються зусилля в палях не тільки зі сторони підпірної стіни, а й з протилежної. Тобто при різному врахуванні крайових умов під час будівництва в щільній міській забудові з улаштуванням глибоких котлованів відбувається різний перерозподіл зусиль між палями у фундаменті.

Цей факт про перерозподіл внутрішніх зусиль у фундаментних конструкціях можна аналізувати і за картиною ізополів осідання фундаментної плити (рис. 7).

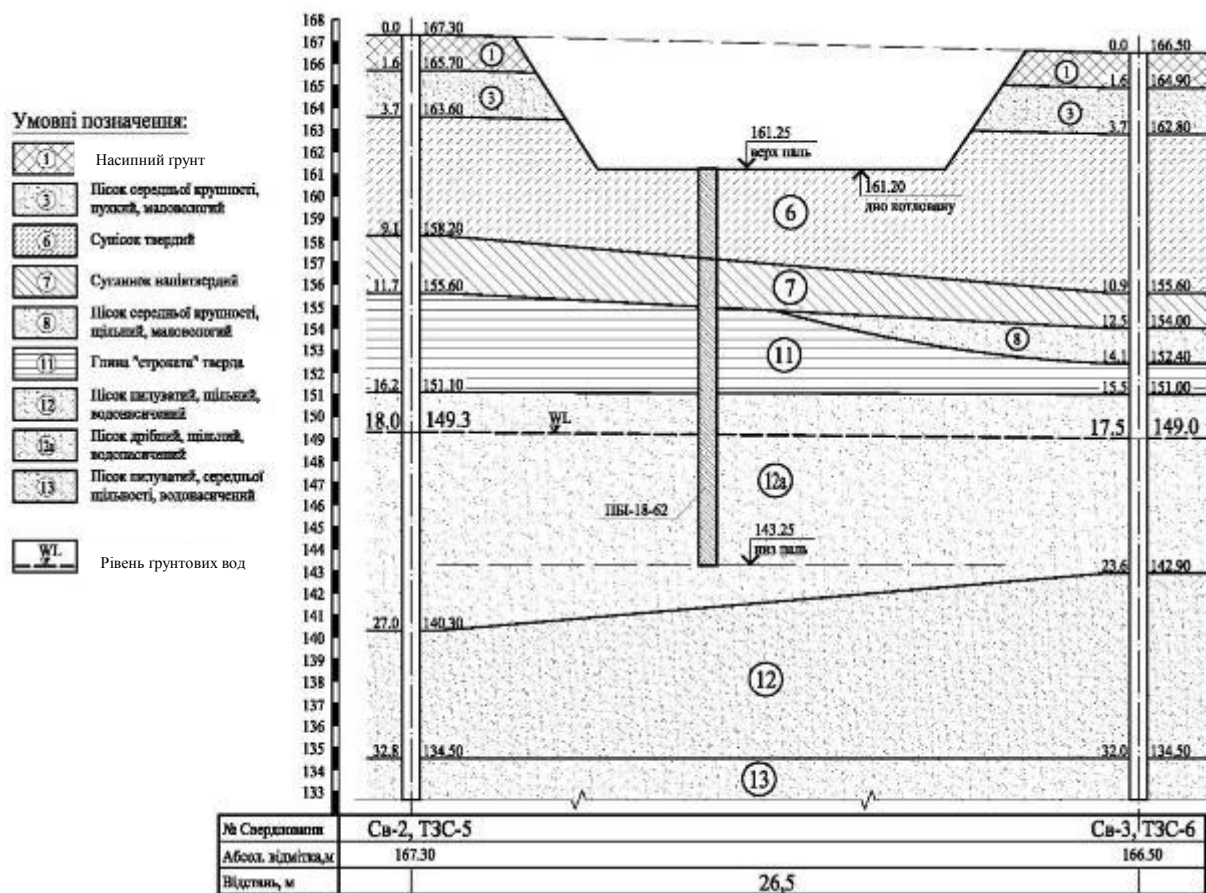


Рис. 5. Інженерно-геологічний розріз із прив'язкою паль

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ ІГЕ	Щільність ґрунту ρ , г/см ³	Природна вологість W	Коефіцієнт пористості e	Кут внутрішнього тертя φ , град.	Питоме зчеплення c , кПа	Модуль деформації E , МПа
1	1,67	0,03	0,64	35	1	9
3	1,51	0,03	0,82	24	1	8
6	1,96	0,15	0,58	26	15	23
7	1,82	0,13	0,67	21	23	21
8	1,82	0,03	0,50	36	2	45
11	1,89	0,21	0,77	16	25	16
12	2,01	0,20	0,56	33	5	25
12a	2,01	0,19	0,54	36	4	38
13	1,96	0,24	0,68	30	1	24

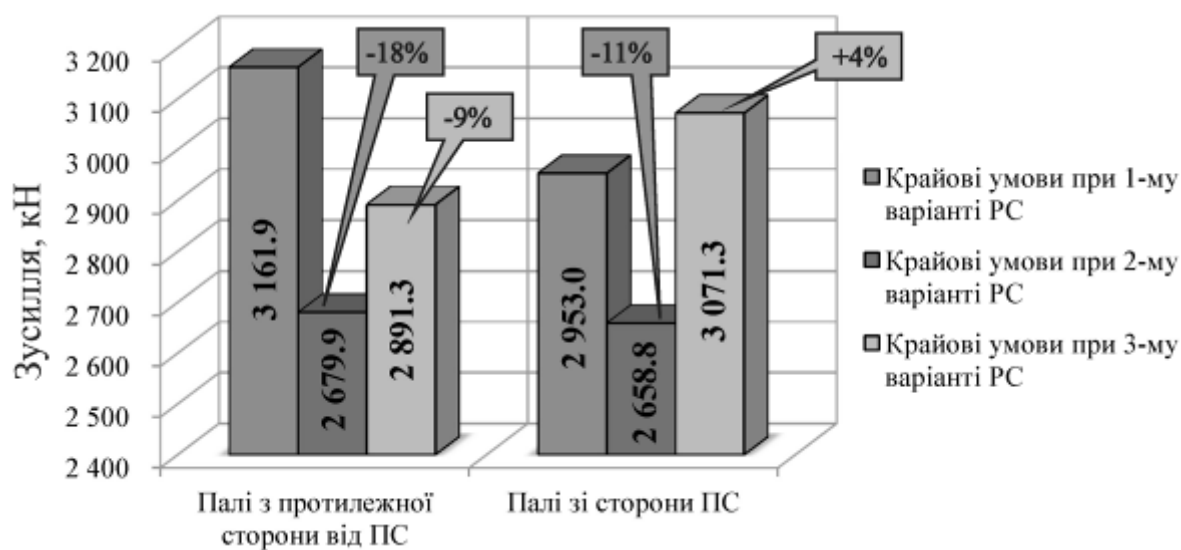


Рис. 6. Зусилля у головах кутових палей, кН

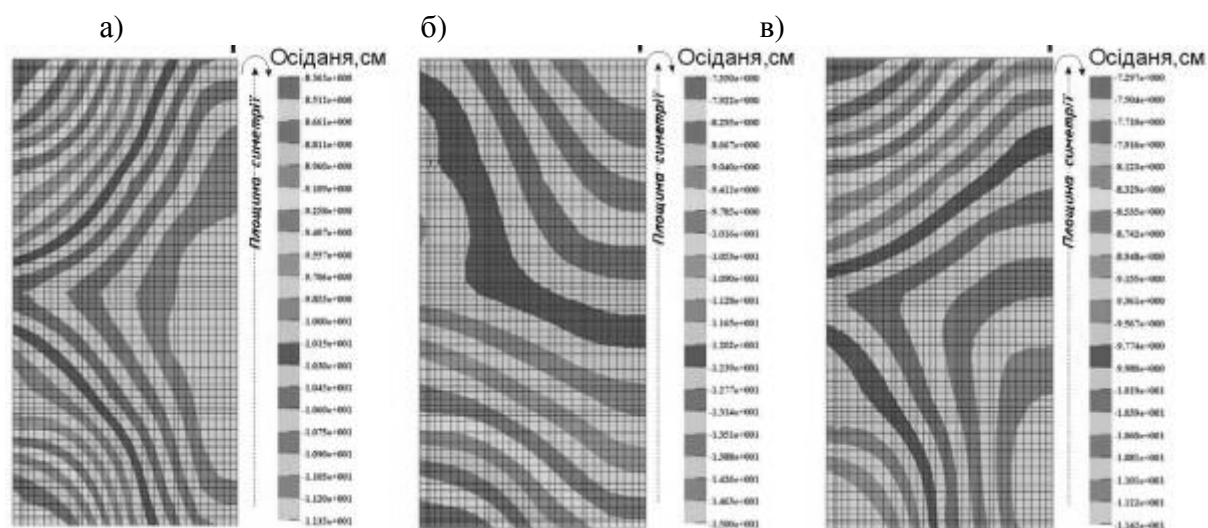


Рис. 7. Ізополя осідання фундаментної плити, см:

а) традиційний варіант РС; б) обмежений варіант РС; в) загальний варіант РС

Висновки. Установлено, що при різному врахуванні крайових умов характер осідань змінюється як кількісно, так і якісно. При «обмеженому» варіанті крайових умов осідає зона фундаментної плити біля підпірної стіни, а при «загальному» варіанті – осідає її протилежна ділянка. Тому при зведенні висотних будинків в умовах щільної міської забудови з улаштуванням глибоких котлованів необхідно враховувати в розрахунках разом з реальним ґрунтовим масивом усі інженерні споруди і захисні конструкції.

Згинальні моменти у фундаментній плиті носять більш рівномірний характер, але в окремих зонах знак моменту змінюється на протилежний, що необхідно враховувати при армуванні. Зусилля в палях змінюються до 20%.

Доведено, що крайові умови впливають на напружено-деформований стан системи «основа – інженерні конструкції – фундамент – надземні конструкції».

Література

1. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою / І.П. Бойко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Вип. 30 / Відповідальний редактор І.П. Бойко. – К.: КНУБА, 2006. – С. 3 – 8.
2. Кураш С.Ю. Влияние глубокого котлована на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива в условиях плотной городской застройки г. Киева / С.Ю. Кураш, И.Р. Сазонова, Ю.И. Калюх, Т.Г. Каргопольцева // *Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. – К.: НДІБК. – 2008. – Вип. 71. – Т. 1. – С. 434 – 442.
3. Горбунов-Посадов М.И. Расчет конструкций на упругом основании / Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
4. Катценбах Р. Последние достижения в области фундаментостроения высотных зданий на сжимаемом основании // *Вестник МГСУ*, 2006. – Вип. 1. – С. 105 – 118.
5. Підлуцький В.Л. Взаємодія фундаментної плити з палями різної довжини з ґрунтовою багатопшаровою основою: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Підлуцький Василь Леонідович. – К.: КНУБА, 2013. – 230 с.
6. Сахаров В.О. Моделирование взаимодействия палевого фундамента с нелинейной основой в условиях прибудови: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Сахаров Володимир Олександрович. – К.: КНУБА, 2005. – 215 с.
7. Улицкий В.М. Расчеты и интерактивный мониторинг при строительстве зданий в сложных грунтовых условиях. Технологии безопасности и инженерные системы / В.М. Улицкий, К.Г. Шашкин, А.Г. Шашкин. – С-Пб: Стройиздат, 2007. – №2 (13). – С.16 – 19.
8. Городецкий А.С. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона: проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии / Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А. – К.: Факт, 2004. – 106 с.
9. Reul O. Piled rafts in overconsolidated clay — comparison of in-situ measurements and numerical analyses / O. Reul, M.F. Randolph // *Géotechnique*, 2003. – V. 53. – №3. – P. 301 – 315.

© В.Л. Підлуцький
Надійшла до редакції 20.05.2015