

АНОТАЦІЯ

Маламан А.Р. Взаємодія підпірних стін з ґрунтовим середовищем при урахуванні їх просторової жорсткості. – 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, 2026 р.

У дисертаційній роботі досліджено особливості формування напружено-деформованого стану системи «ґрунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі».

У першій частині дисертації розглянуто різні види конструктивних рішень гнучких підпірних стін, які використовуються для влаштування огороження котлованів та інженерного захисту територій на зсувонебезпечних ділянках. Наведено аналіз методів розрахунку гнучких підпірних стін: графічні та аналітичні та із застосуванням числового моделювання. Для оцінки напружено-деформованого стану підпірних стін складної конфігурації в плані та оцінки впливу влаштування глибоких котлованів на навколишню забудову використовуються числові методи. Числове моделювання напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі», виконане з використанням методу скінченних елементів, що дозволяє комплексно проаналізувати формування та зміну деформацій та напружень в усіх елементах системи. Важливим питанням числового моделювання є вибір моделі ґрунтового середовища. У роботі розглянуто три моделі, що описують нелінійну поведінку ґрунту: модель з критерієм міцності Кулона-Мора (MC), Hardening Soil Model (HSM) та модифікована модель Hardening Soil Small Strain (HSS). Ідеально-пружно-пластична модель з критерієм міцності Кулона-Мора є широко вживаною на практиці і базується на двох складових: на законі Гука й умові міцності Кулона-Мора, основним недоліком даної моделі є неточний опис поведінки ґрунтового середовища в умовах його розвантаження, що має місце при влаштуванні глибоких котлованів. Модель HSM – модель пружно-пластичного деформування ґрунтів зі зміною

параметрів жорсткості ґрунтового середовища в залежності від рівня напружень у ґрунті. Перевагою даної моделі є можливість врахування різних параметрів жорсткості в траєкторіях навантаження / розвантаження, що важливо для розрахунку гнучких підпірних стін огороження глибоких котлованів. Модель HSS - враховує жорсткість ґрунту при малих деформаціях, заснована на пружно-пластичній моделі ґрунту, що зміцнюється (HSM) і використовує подібний набір параметрів з додатковими параметрами (модуль зсуву при надмалих деформаціях та рівень зсувної деформації), що точніше описує додаткові деформації існуючих будівель в умовах щільної міської забудови, але потребує детальніших лабораторних досліджень ґрунтів.

У другій частині з метою дослідження впливу виду напружено-деформованого стану на розподіл зусиль і переміщень в підпірній стіні та деформації оточуючої забудови було розв'язано 2 тестові задачі. Показано, що значення переміщень та згинальних моментів, в елементах гнучкої підпірної стіни, отриманих за результатами числового моделювання в плоскій постановці, вищі за значення отримані за результатами числового моделювання в просторовій постановці на 38-205% та 25-72% відповідно. Досліджено, що на напружено-деформований стан підпірних стін впливає співвідношення сторін котловану (B_k/L_k). При співвідношенні сторін приблизно 1:1 ріст переміщень та зусиль, в елементах гнучких підпірних стін, у центральній частині котловану по відношенню до крайових зон відбувається з постійним зростанням (динаміка змін підпорядковується показниковій залежності), а при збільшенні співвідношення сторін котловану, до 1:2 та більше разів, прослідковується чітко виражена лінійна ділянка в центральній частині довшої сторони котловану, на якій не відбувається суттєвої зміни згинальних моментів та переміщень в елементах підпірної стіни. Виявлено, що значення додаткових осідань будинку, отриманих за результатами числового моделювання в плоскій постановці, значно вищі за значення, отримані за результатами числового моделювання в просторовій постановці, а саме: мінімальна різниця в значеннях додаткових осідань існуючого будинку становить 197%. За рахунок врахування просторової жорсткості, а також розміщення існуючого будинку в плані по відношенню до кута котловану (на різній відстані між кутом котловану та центральною віссю будинку) виникає можливість коректної оцінки впливу влаштування глибокого

котловану на існуючу забудову. Різниця між значеннями додаткових осідань існуючого будинку при розташуванні його центральної осі напроти середини прольоту котловану ($L_K/2$) та напроти кута котловану складає 150%.

У третій частині показано експериментальні дослідження оцінки деформацій гнучких підпірних стін огороження котловану та додаткові осідання оточуючої забудови. Було проведено аналіз даних геодезичного моніторингу та виконано зворотні задачі числового моделювання напружено-деформованого стану елементів системи «грунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі», з метою порівняння результатів фактичних деформацій та їх величин прогнозованих числовим моделювання. Дослідження показали, що безпосереднє використання параметрів ґрунтів, наведених у звіті з інженерно-геологічних вишукувань, для числового моделювання без їх ідентифікації може призвести до значної (у 2-3,5 рази) похибки у визначенні розрахункових значень переміщень конструкцій. Основними причинами цього є: неточність визначення параметрів ґрунтів під час геологічних вишукувань та невідповідність режимів їх випробувань фактичним змінам їх напруженого стану протягом декількох циклів навантаження / розвантаження / повторного навантаження властивим ситуаціям влаштування глибоких котлованів та подальшому спорудженні в них фундаментів нових будівель, неоднорідність ґрунтових умов, вплив технології зведення підпірних стін на стан ґрунтів тощо. Показано, що числове моделювання з використанням плоскої розрахункової схеми характеризується систематичним завищенням розрахункових значень переміщень порівняно з результатами моніторингу. Значення додаткових осідань існуючих будівель вищі на 67–100% (середнє значення 84%), горизонтальні переміщення верху підпірних стін – на 45–412% (середнє 185%). Крім того, аналіз розподілу згинальних моментів у палях демонструє, що використання плоскої розрахункової схеми призводить до завищення їх значень на 14–33% (середнє 25%) відносно тривимірної моделі, що призводить в подальшому до перевитрат матеріалів і підвищення вартості конструкцій підпірних стін. Така різниця зумовлена ігноруванням просторових ефектів взаємодії конструкцій, зокрема роботи розпірної системи та варіабельності геометрії котловану. Запропоновано алгоритм оцінки напружено-деформованого стану елементів системи «грунтовий масив –

підпірні стіни – існуючі будівлі», що відображає комплексний процес проектування підпірних стін.

У четвертій частині проведено результати практичного застосування запропонованого алгоритму визначення напружено-деформованого стану елементів системи «грунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі» з урахуванням їх просторової жорсткості для реальних інженерно-геологічних умов на трьох об'єктах у м. Києві. Показано, що просторова скінченно-елементна модель дає змогу врахувати просторову жорсткість конструкцій і відповідно більш комплексно оцінити напружено-деформований стан елементів системи «грунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі». Використання просторової скінченно-елементної моделі робить можливим врахування фактору просторової жорсткості конструкцій, що надалі дає змогу більш ефективно запроектувати конструкції підпірних стін. Недоліками даного методу є значна потреба в потужності обчислювального пристрою та час розрахунків. Переміщення та згинальні моменти отримані з використанням моделювання в плоскій постановці є на 15-35% більшими ніж з використанням просторової постановки, що є цілком логічним, оскільки просторова скінченно-елементна модель дає змогу врахувати просторову жорсткість конструкцій і відповідно більш комплексно оцінити напружено-деформований стан елементів системи «грунтовий масив – підпірні стіни – існуючі будівлі». Показано, що врахування просторової жорсткості гнучких підпірних стін при оцінці впливу влаштування глибоких котлованів в умовах щільної міської забудови призводить до зменшення прогнозованих значень додаткових осідань існуючих будівель до 1,5 рази у порівнянні із моделюванням аналогічних задач в умовах плоского напружено-деформованого стану.

Ключові слова: гнучкі підпірні стіни, числове моделювання, напружено-деформований стан, просторова жорсткість, плоска скінченно-елементна модель, просторова скінченно-елементна модель, геодезичний моніторинг.

ABSTRACT

Malaman A.R. Interaction between retaining walls and the soil environment, taking into account their spatial rigidity. – Qualification thesis in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 192 – Construction and Civil Engineering, field of knowledge 19 – Architecture and Construction. – Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

This thesis investigates the characteristics of the stress-strain state formation of the ‘soil mass – retaining walls – existing buildings’ system for retaining walls.

In the first part of the dissertation, various types of structural solutions for flexible retaining walls used for excavation enclosures and engineering slope protection on landslide-prone sites are reviewed. An analysis of methods for calculating flexible retaining walls is presented, including graphical, analytical, and numerical modelling approaches. Numerical methods are used to evaluate the stress-strain state of retaining walls with complex plan configurations and to assess the impact of deep excavations on surrounding structures. Numerical modelling of the stress-strain state of elements within the system “soil mass – retaining walls – existing buildings” is performed using the finite element method, which enables a comprehensive analysis of deformation and stress evolution throughout all system elements. The choice of soil constitutive model is identified as a key issue in numerical modelling. Three models describing the nonlinear behaviour of soil are considered: the Mohr–Coulomb criterion model (MC), the Hardening Soil Model (HSM), and the modified Hardening Soil Small Strain model (HSS). The ideal elasto-plastic Mohr–Coulomb model is widely used in practice and is based on Hooke’s law combined with the Mohr–Coulomb failure criterion; its main shortcoming is the inaccurate description of soil behaviour during unloading, which is characteristic of deep excavation conditions. The HSM is an elastoplastic model with stress-dependent stiffness parameters, offering the advantage of accounting for different stiffness values along loading and unloading/reloading paths, which is particularly

important for flexible retaining wall design in deep excavations. The HSS model accounts for small-strain soil stiffness; it is based on the HSM and employs a similar set of parameters supplemented by two additional ones (small-strain shear modulus and reference shear strain level), providing a more accurate description of additional settlements of existing buildings in dense urban environments, though it requires more detailed laboratory soil investigations.

In the second part, two benchmark problems were solved to investigate the effect of the stress-strain state type on the distribution of internal forces and displacements in retaining walls and additional settlements of surrounding structures. It is shown that displacements and bending moments in flexible retaining wall elements obtained from two-dimensional numerical modelling exceed the values obtained from three-dimensional numerical modelling by 38–205% and 25–72%, respectively. The influence of the excavation aspect ratio (B_k/L_k) on the stress-strain state of retaining walls is examined. At an aspect ratio of approximately 1:1, the increase in displacements and internal forces in flexible retaining wall elements from the corner zones toward the centre follows an exponential trend. As the aspect ratio increases to 1:2 or greater, a clearly defined linear region emerges in the central section of the longer side, along which bending moments and displacements do not change significantly. It is found that the additional settlements of a building obtained from two-dimensional numerical modelling are substantially higher than those from three-dimensional modelling, with a minimum difference of 197%. Accounting for three-dimensional rigidity and the relative position of an existing building with respect to the excavation corner (at varying distances between the corner and the building's central axis) enables a more accurate assessment of the impact of deep excavation on the surrounding development. The difference in additional settlements between the case where the building's central axis is positioned opposite the mid-span of the excavation ($L_k/2$) and the case where it is positioned opposite the corner amounts to 150%.

In the third part, experimental investigations of deformations of flexible retaining walls for excavation enclosures and additional settlements of surrounding buildings are presented. Geodetic monitoring data were analysed and back-analysis numerical

modelling of the stress-strain state of the system “soil mass – retaining walls – existing buildings” was performed to compare actual measured deformations with numerically predicted values. The studies showed that directly using soil parameters from geotechnical investigation reports for numerical modelling without prior parameter identification can lead to significant errors in predicted structural displacements, by a factor of 2 to 3.5. The main reasons are: inaccuracies in determining soil parameters during site investigations; inconsistency between laboratory test conditions and the actual stress path changes occurring through multiple loading/unloading/reloading cycles typical of deep excavation and subsequent foundation construction; soil heterogeneity; and the influence of retaining wall construction technology on the surrounding soil. It is demonstrated that two-dimensional numerical modelling systematically overestimates computed displacements relative to monitoring results: additional settlements of existing buildings are overestimated by 67–100% (mean 84%), and horizontal displacements at the top of retaining walls by 45–112% (mean 185%). Furthermore, analysis of the bending moment distribution in piles shows that the two-dimensional approach overestimates bending moments by 14–33% (mean 25%) compared to the three-dimensional model, leading to excessive material consumption and increased costs for retaining wall structures. This discrepancy is caused by the omission of spatial interaction effects between structural elements, including the contribution of the strutting system and variability of excavation geometry. An algorithm for evaluating the stress-strain state of the system “soil mass – retaining walls – existing buildings” is proposed, reflecting the comprehensive process of retaining wall design.

In the fourth part, results of the practical application of the proposed algorithm for determining the stress-strain state of the system “soil mass – retaining walls – existing buildings”, accounting for three-dimensional rigidity, are presented for three real geotechnical conditions at construction sites in Kyiv. It is demonstrated that the three-dimensional finite element model enables the spatial rigidity of structures to be taken into account and thereby provides a more comprehensive evaluation of the stress-strain state of all system elements. The use of a three-dimensional finite element model makes it possible to incorporate the spatial rigidity factor, which in turn allows for more efficient

design of retaining wall structures. The main drawbacks of this method are the substantial computational resource requirements and extended calculation times. Displacements and bending moments obtained from two-dimensional modelling are 15–35% higher than those from three-dimensional modelling, which is fully consistent with the fact that a three-dimensional finite element model properly accounts for spatial rigidity and thus provides a more complete assessment of the stress-strain state. It is shown that considering the spatial rigidity of flexible retaining walls when evaluating the influence of deep excavations in densely built-up urban areas reduces predicted additional settlements of existing buildings by up to 1.5 times compared to equivalent two-dimensional plane-strain analyses.

Keywords: flexible retaining walls, numerical modelling, stress-strain state, spatial rigidity, two-dimensional finite element model, three-dimensional finite element model, geodetic monitoring.