

*М.Л. Зоценко, д.т.н., професор, Ю.Л. Винников, д.т.н., професор
М.О. Харченко, к.т.н., В.І. Марченко, к.т.н.
А.М. Виноградова, студентка, О.В. Костенко, студент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
В.А. Титаренко, к.т.н., с.н.с.*

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ЗСУВНОГО СХИЛУ

Наведено методику та результати моделювання напружено-деформованого стану забудованого зсувонебезпечного схилу за допомогою методу скінченних елементів. Запропоновано ряд інженерних заходів щодо ліквідації аварійного стану на схилі, стабілізації зсувних явищ і подальшої експлуатації схилу як паркової зони чи у разі його забудови.

Ключові слова: *зсувонебезпечний схил, чисельне моделювання, коефіцієнт стійкості, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, підпірна конструкція, армування ґрунту.*

*Н.Л. Зоценко, д.т.н., професор, Ю.Л. Винников, д.т.н., професор
М.А. Харченко, к.т.н., В.И. Марченко, к.т.н.
А.Н. Виноградова, студентка, А.В. Костенко, студент
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
В.А. Титаренко, к.т.н., с.н.с.*

*ГП «Государственный научно-исследовательский институт
строительных конструкций», г. Киев*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА

Приведена методика и результат моделирования напряженно-деформированного состояния застроенного оползнеопасного склона с помощью метода конечных элементов. Предложен ряд инженерных мероприятий по ликвидации аварийного состояния склона, стабилизации оползневых явлений и дальнейшей эксплуатации склона в качестве парковой зоны или в случае его застройки.

Ключевые слова: *оползнеопасный склон, численное моделирование, коэффициент стойкости, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, подпорная конструкция, армирование грунта.*

*M.L. Zotcenko, Prof., DrSc., Y.L. Vynnykov, Prof., DrSc.
M.O. Kharchenko, Dr-Ing., V.I. Marchenko, Dr-Ing.
A.M. Vynogradova, student, O.V. Kostenko, student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
V.A. Tytarenko, Dr-Ing.
The State Research Institute of Building Constructions, Kiev*

SIMULATION OF STRESSED-DEFORMED STATE OF SOIL MASIF OF LANDSLIDE SLOPE

The methodology and results of 3D simulation of stressed-deformed state of the built-up landslide slope using the finite element methods are presented in this article. It were proposed the engineering solutions for elimination of failure state of the slope, stabilization of landslide effects and following use of slope for parkland or in the case of its building.

Keywords: *landslide slope, numerical simulation, stability factor, stressed-deformed state, finite elements method, retaining structure, soil reinforcement.*

Вступ. Існує велика кількість забудованих зсувонебезпечних схилів, при втраті стійкості яких виникає загроза руйнування будівель і людських жертв. Для уникнення таких аварійних ситуацій проводять моніторинг зсувних процесів, улаштовують утримуючі споруди різних типів, виконують організований водозбір тощо [1 – 7].

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Причини появи та розвитку зсувних явищ, проблеми боротьби зі зсувами, методи закріплення і конструктивні рішення із забезпечення стійкості схилів досліджували В.П. Ананьєв, С.В. Біда, І.П. Бойко, О.М. Богомолів, Ю.Й. Великодний, Л.К. Гінзбург, А.Л. Готман, Б.І. Далматов, М.Г. Демчишин, А.М. Дранников, Ю.І. Калюх, Е.Я. Кільвандер, М.В. Корнієнко, І.І. Ларцева, І.Я. Лучковський, М.М. Маслов, С.Й. Мацій, С.Р. Месчан, О.О. Петраков, Е.Ю. Петренко, В.А. Соколов, Є.А. Сорочан, Г.Г. Стрижельчик, К.Ш. Шадунц, В.Б. Швець, О.М. Трофимчук, А.В. Яковлєв, Є.О. Яковлєв та інші [3 – 7].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. На сьогодні існує ряд інженерних методик оцінювання стійкості масиву ґрунту на схилі. Кожна з них має переваги та недоліки. При цьому новітнім напрямом є чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) схилів і визначення їх стійкості.

Тому за **мету роботи** прийнято проведення моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) НДС ґрунтового масиву зсувного схилу та розроблення інженерних заходів щодо стабілізації зсувних явищ.

Основний матеріал і результати. У центральній частині м. Київ, у районі Байкового кладовища, після значних опадів у травні 2013 р. відбувся зсув ґрунту на схилі. При цьому ширина зсуву становила близько 34 м, довжина 13...52 м (рис. 1). Відстань від бровки зриву до 3 – 4-поверхового паркінгу висотної будівлі становила близько 18,5 м.

Підшва схилу закріплена підпірною спорудою з буронабивних паль діаметром 600 мм, обкладеною бутовим каменем, висотою 1,5...2,5 м. У процесі зсуву нижня підпірна стіна була майже зруйнована (рис. 2).

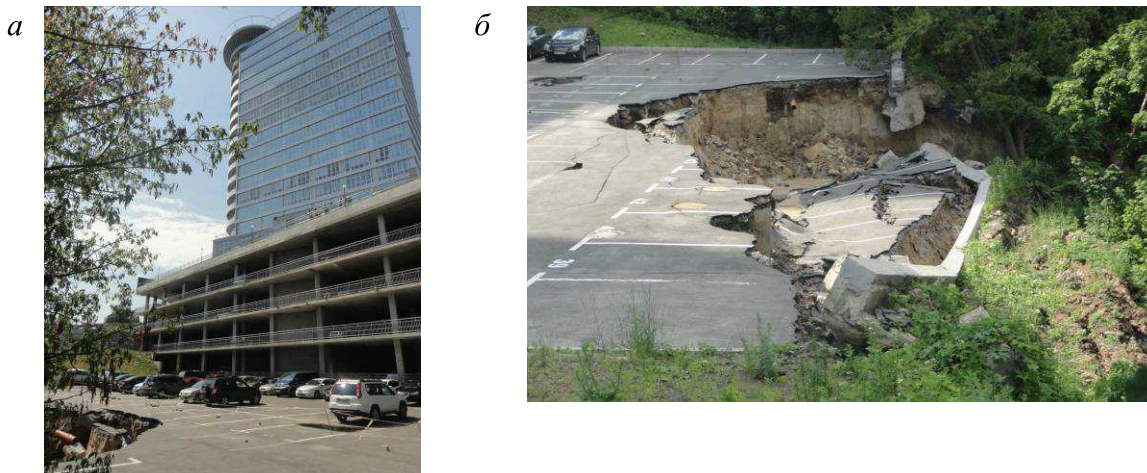


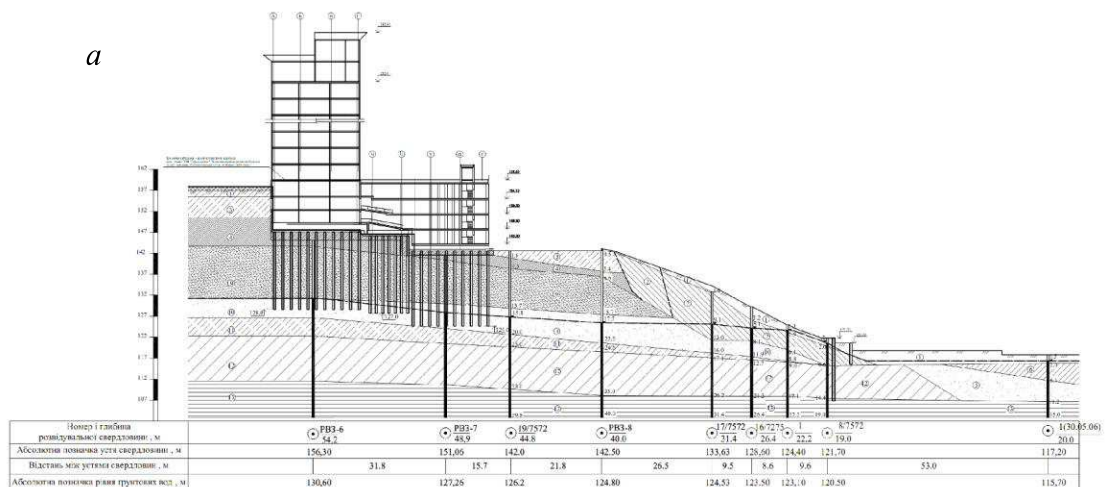
Рис. 1. Зсувні процеси на схилі: а – висотна будівля у верхній частині схилу; б – загальний вигляд схилу після зсуву



Рис. 2. Загальний вигляд підпірної стіни внизу схилу після зсуву

За даними вишукувань виділено 13 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), опис яких наводиться зверху вниз: 1) ІГЕ-1 – пісок і супісок насипні, неоднорідні; 2) ІГЕ-2 – делювіальні ґрунти – супіски, суглинки 3) ІГЕ-3 – супісок лесований, твердий, просадочний; 4) ІГЕ-4 – суглинок лесований, твердий та тугопластичний; 5) ІГЕ-5 – пісок дрібний, середньої щільності, водонасичений; 6) ІГЕ-6 – супісок текучий; 7) ІГЕ-7 – суглинок м'якопластичний; 8) ІГЕ-8 – глина напівтверда; 9) ІГЕ-9 – пісок пилюватий, середньої щільності, від малого ступеня насичення до насиченого водою на рівні підземних вод; 10) ІГЕ-10 – пісок дрібний і середньої крупності, середньої щільності, водонасичений; 11) ІГЕ-11 – супісок текучий; 12) ІГЕ-12 – суглинок (наглинок) твердий і напівтвердий; 13) ІГЕ-13 – глина мергелиста, від твердої до тугопластичної.

Інженерно-геологічний розріз із прив'язкою багатопверхової будівлі до та після зсуву наведено на рис. 3.



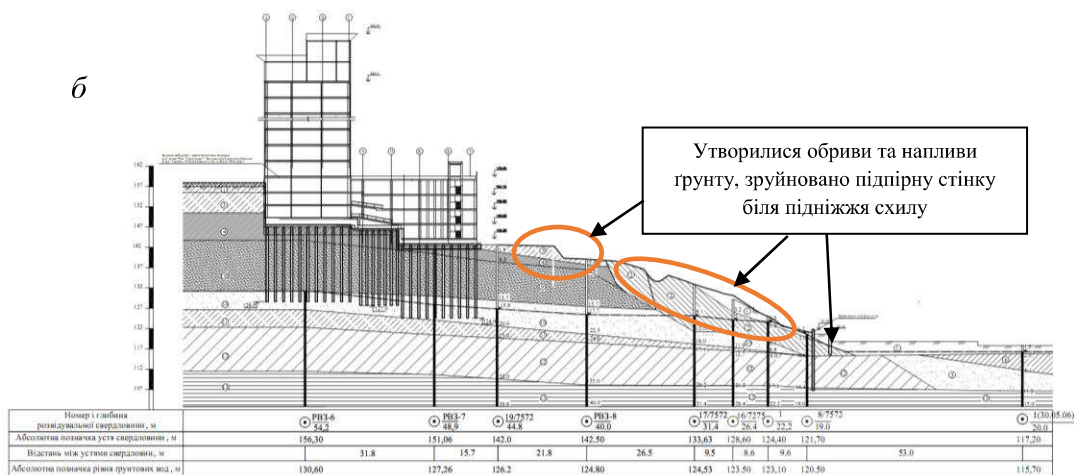


Рис. 3. Інженерно-геологічний розріз із прив'язкою багатопверхової будівлі до (а) та після (б) зсуву

Характеристики міцності делювіальних ґрунтів, лесованих супісків і суглинків, що складають схил, визначені у приладах одноплощинного зрушення за схемою прискореного неконсолідованого зрізу та повторного прискореного зрізу за методом «плашка по плашці» у природному й водонасиченому станах. Структурне зчеплення $c_{стр}$ визначено відповідно до нормативного документа [1]. Розрахункові значення характеристик міцності ґрунту для граничних станів першої групи визначено з довірчою вірогідністю 0,95 за методикою ДСТУ Б В.2.1-5-96. Механічні моделі та фізико-механічні властивості ґрунтів основи, фундаментів і підпірних конструкцій, використані для чисельного моделювання, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Механічні моделі та фізико-механічні властивості ґрунтів основи, фундаментів і підпірних конструкцій

| № ІГЕ, найменування матеріалу | Модель матеріалу | Питома вага | | | Кут внутрішнього тертя φ , ° | Модуль деформації (пружності) E , МПа | Коефіцієнт Пуассона ν |
|-------------------------------|------------------|------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|
| | | γ , кН/м ³ | водонасиченого ґрунту γ , кН/м ³ | Питома зчеплення c , кПа | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1, 1a | МС | 16,7 | 17,5 | 5 | 14 | 7 | 0,3 |
| 2 | МС | 19,0 | 20,5 | 10,9 | 14,68 | 9 | 0,35 |
| 3 | МС | 17,0 | 19,5 | 11 | 19,72 | 8 | 0,32 |
| 4 | МС | 17,6 | 20,0 | 10,5 | 21 | 10 | 0,35 |
| 5 | МС | 20,0 | 20,0 | 0 | 29 | 25 | 0,3 |
| 6 | МС | 20,0 | 20,0 | 6 | 15 | 9 | 0,32 |
| 7 | МС | 19,8 | 19,8 | 10 | 14 | 8 | 0,35 |
| 5a | МС | 17,8 | 17,8 | 1 | 27 | 28 | 0,3 |
| 6a | МС | 17,9 | 19,0 | 6 | 16 | 10 | 0,32 |
| 7a | МС | 19,9 | 19,9 | 13 | 15 | 12 | 0,35 |
| 8a | МС | 20,1 | 20,1 | 43 | 14 | 25 | 0,37 |

| | | | | | | | |
|--------------------------|---------|------|------|------------|------|------------------|------|
| 9 | МС | 20,6 | 20,6 | 1,3 | 34 | 30 | 0,3 |
| 10 | МС | 19,9 | 19,9 | 1 | 30 | 26 | 0,3 |
| 11 | МС | 19,1 | 19,1 | 7 | 20 | 15 | 0,32 |
| 12 | МС | 19,3 | 19,3 | 33 | 14,5 | 20 | 0,35 |
| 13 | МС | 19,3 | 19,3 | 68 | 12 | 24 | 0,37 |
| Підпірні стіни | Elastic | 25 | - | Non-porous | | $2,3 \cdot 10^4$ | 0,2 |
| Підземна частина будівлі | Elastic | 8 | - | Non-porous | | 200 | 0,3 |
| Підземний паркінг | Elastic | 10 | - | Non-porous | | 100 | 0,3 |
| Грунтово-пальовий масив | Elastic | 20 | 20 | Drained | | 100 | 0,3 |

Примітка: МС – ідеальна пружно-пластична модель ґрунту з критерієм міцності Кулона – Мора

Моделювання для визначення стійкості схилу виконували за схемою, що передбачає зміну характеристик міцності ґрунту до тих пір, поки схил не перейде в стан граничної рівноваги. При такому підході коефіцієнт стійкості схилу визначався як відношення вихідних характеристик міцності до їх граничних значень

$$k_{st} = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{c_r + \sigma \cdot \tan \varphi_r}, \quad (1)$$

де c та φ – вихідні параметри міцності; σ – компонента нормального фактичного напруження; c_r та φ_r – параметри приведеної міцності, необхідні для підтримки рівноваги масиву ґрунту.

За цих передумов зчеплення та тангенс кута природного тертя приводяться в пропорції

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \Sigma M_{sf}. \quad (2)$$

Приведення параметрів міцності контролюється загальним множником ΣM_{sf} , який змінюється при поетапному методі до тих пір, доки не відбудеться руйнування. Тобто ΣM_{sf} і є коефіцієнтом стійкості схилу.

Для спрощення розрахункової схеми системи «надземна частина будівлі – підземна частина будівлі – палі – основа» виконано такі дії:

1) надземна і підземна частини будівлі (паркінг) замінювалися плоскими елементами (кластерами) за пружною моделлю з приведеними характеристиками модуля пружності E_{np} , коефіцієнта Пуассона ν_{np} , питомої ваги γ_{np} (питома вага відповідає вазі підземної частини будівлі, розділеній на її об'єм для коректного моделювання тиску на основу);

2) бурин'єкційні палі та масив ґрунту навколо них наводиться як єдине ціле квазіоднорідне тіло скінченної жорсткості, яке характеризується приведеними модулями загальної пружності (E_{np}) й коефіцієнтами Пуассона (ν_{np}), питома вага визначається як середньовиважена величина між ґрунтом і бетоном за площею.

Визначення стійкості схилу після зсуву та аналіз можливої втрати стійкості для багатоповерхової будівлі виконано чисельним моделюванням за допомогою МСЕ поетапно.

На першому етапі моделювалися вертикальні $\sigma_{v,0}$ й горизонтальні $\sigma_{h,0}$ початкові ефективні навантаження у ґрунті за допомогою способу гравітаційного навантаження (Gravity Loading). Такий підхід дає можливість достовірно оцінити НДС масиву, ніж спосіб K_0 -procedure. Після цього етапу переміщення обнулялися на початку наступної фази розрахунку для уникнення впливу «гравітаційного навантаження» на переміщення, що будуть отримані в процесі наступних розрахунків.

На другому етапі моделювалося зведення багатоповерхової будівлі. Розрахункову схему цього етапу наведено на рис. 4, а, а скінченно-елементну (СЕ) схему – на рис. 4, б. Результати етапу не аналізувалися, оскільки він був проміжний.

На третьому етапі визначався коефіцієнт стійкості схилу після зведення висотної будівлі. Результати розрахунку наведено на рис. 5, з якого видно, що після зведення цих будівель коефіцієнт стійкості склав $k_{st}=0,989$, що менше від нормативного 1,2...1,35. Це означає, що при будь-якому додатковому впливові на НДС ґрунтів схилу можлива активізація зсувних явищ.

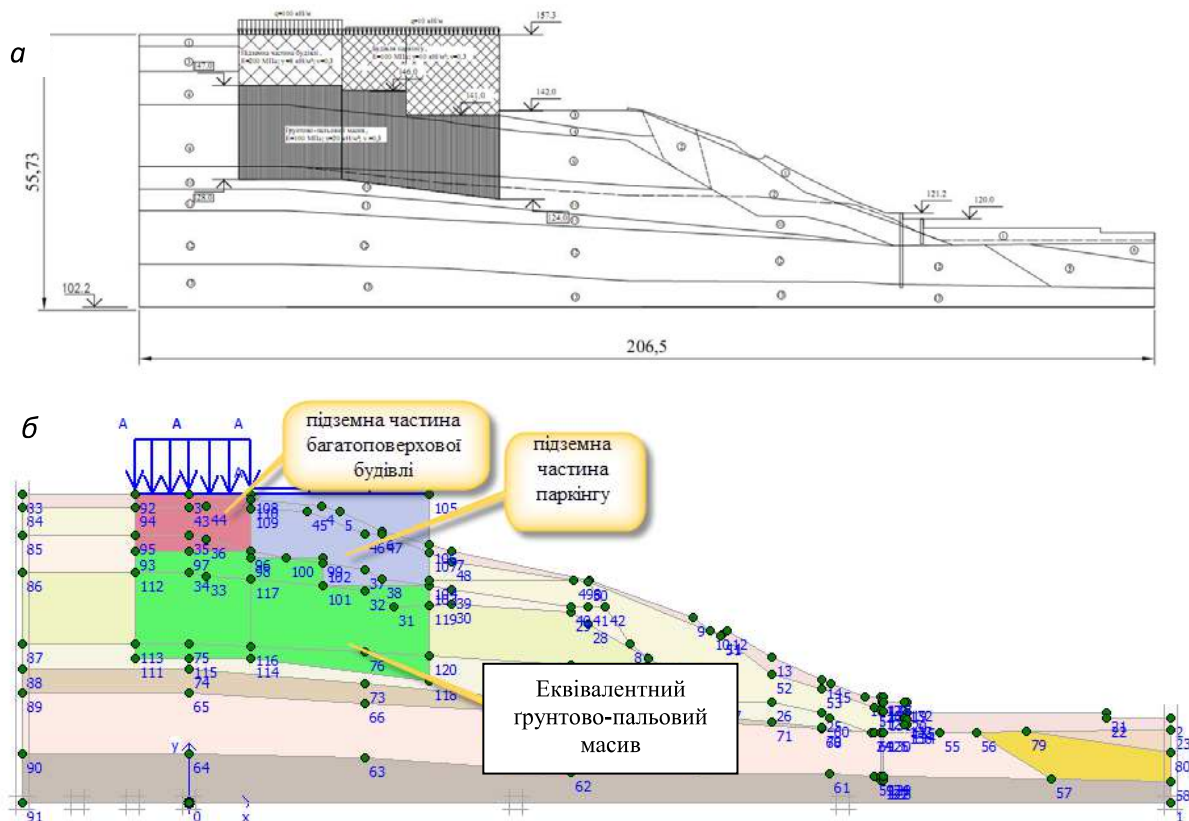


Рис. 4. Розрахункова (а) та СЕ (б) схеми для визначення стійкості масиву схилу після зведення висотної будівлі

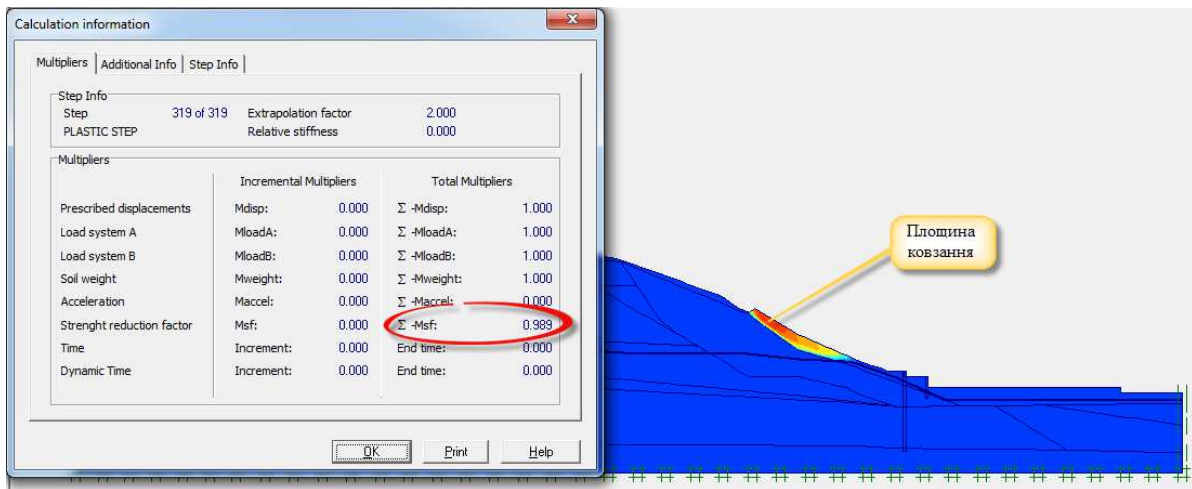


Рис. 5. Результат визначення стійкості схилу після зведення будівель

На четвертому етапі моделювався НДС схилу після зсувних явищ з урахуванням фактичного балансу земляних мас на момент обстеження та навантажень від існуючих будівель. Розрахункову скінченноелементну схему для цього етапу наведено на рис. 6. Результати етапу не аналізувалися, оскільки він був проміжний.

Розрахунок загальної стійкості схилу з урахуванням фактичного балансу земляних мас на момент обстеження і навантажень від існуючих будівель проведено на п'ятому етапі. Результати розрахунку наведено на рис. 7, з якого видно, що коефіцієнт стійкості склав $k_{st} = 1,124$, що менше від нормативного 1,2...1,35. Це означає, що при будь-якому додатковому впливові на НДС ґрунтів схилу можлива активізація зсувних явищ.

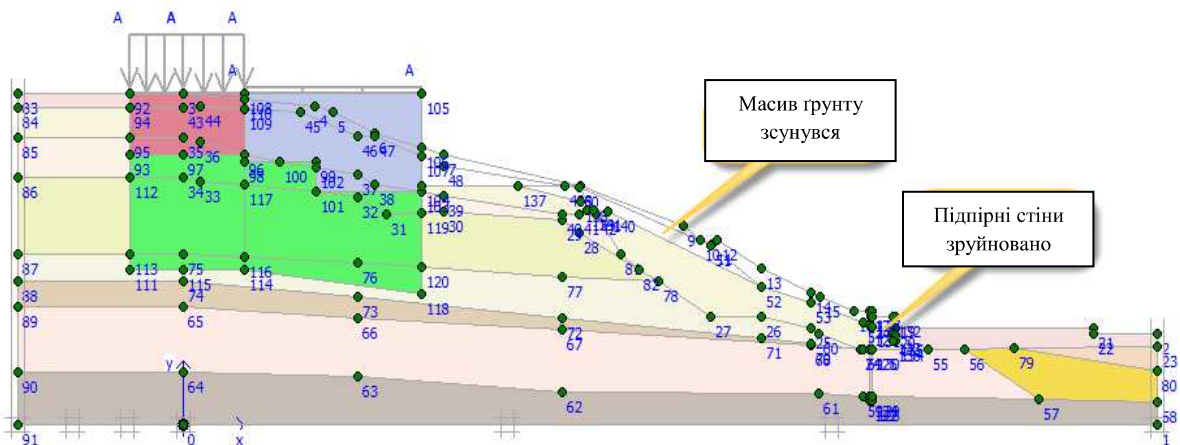


Рис. 6. Розрахункова СЕ схема схилу після зсуву

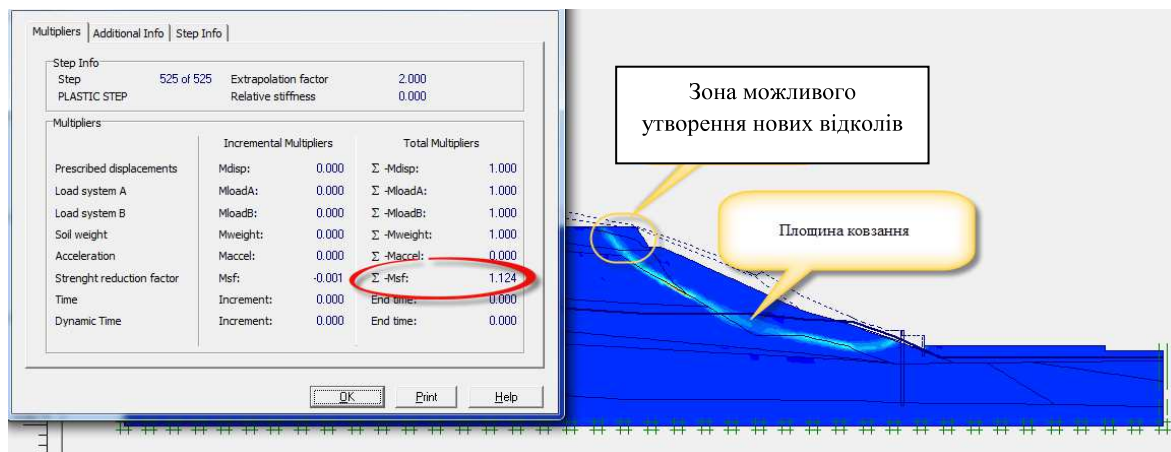


Рис. 7. Результат визначення стійкості схилу після зсувних явищ

На основі виконаних розрахунків із визначення загальної стійкості схилу з висотною будівлею в цілому встановлено, що стійкість схилу не забезпечена, а стійкість будівлі на пальових фундаментах забезпечена. Такий факт впливає з того, що всі можливі лінії ковзання знаходяться в межах масиву ґрунту, що нижче по схилу. Таким чином, існуючий зсув і його подальший розвиток не впливає на стійкість висотної будівлі, а лише погіршує експлуатаційні властивості прилеглої до неї території.

У делювіальних ґрунтах, що складають схил, при замоканні зменшуються характеристики зчеплення і під дією сили тяжіння цей шар зсувається. Тому в цьому випадку одним із варіантів стабілізації зсувних явищ на схилі є зрізання ґрунтів (потужністю від 6 до 13 м). Такий варіант буде раціональним лише за умов майбутньої забудови схилу. В інших випадках доцільно провести ряд інженерних заходів щодо стабілізації зсувних явищ на схилі.

Для стабілізації зсувних процесів рекомендовано виконати такі інженерні заходи. У верхній частині схилу біля утвореного після зсуву обриву влаштувати підпірну стіну з буронабивних паль довжиною 10 м з основою в ІГЕ-9 (пісок полтавський, пилуватий, середньої щільності).

Ця підпірна конструкція перешкоджатиме подальшому відколюванню блоків супіску лесованого в глиб плато.

Для збільшення стійкості схилу доцільно провести його терасування зі співвідношенням 1:3 з улаштуванням габійних конструкцій шириною 0,5 м і висотою 1,0 м. При цьому виконати зрізання ґрунту з верхньої частини схилу та підсилення в його нижній частині. На першому етапі обов'язкове розчищення схилу від звалищ різноманітних відходів до корінної основи ґрунтів, розчищення схилу від сухих, старих і повалених дерев, засипання існуючих ярів місцевим глинистим ґрунтом із пошаровим ущільненням, виконання виположування вертикальних сколів ґрунту по схилу, видалення нижнього «язика» зсуву.

Внизу схилу на ділянці, нижчій від існуючих зруйнованих підпірних стін, улаштувати нову підпірну стіну з буронабивних паль глибиною 10 м з

основою в ІГЕ-12 – суглинок (наглинок) твердий і напівтвердий. Після виконання цих робіт існуючі зруйновані підпірні стіни доцільно розібрати.

Для можливого використання як місця для паркування другої зверху тераси необхідно додатково влаштувати підпірну стіну глибиною 6 м і виконати закріплення другої та третьої терас вертикальними ґрунтоцементними елементами діаметром 500 мм з кроком $5d = 2,5$ м. При цьому також зменшиться зсувний тиск на нову підпірну стіну внизу схилу.

Для підтвердження ефективності вищеперелічених інженерних заходів виконано моделювання, розрахункові схеми якого наведено на рис. 8.

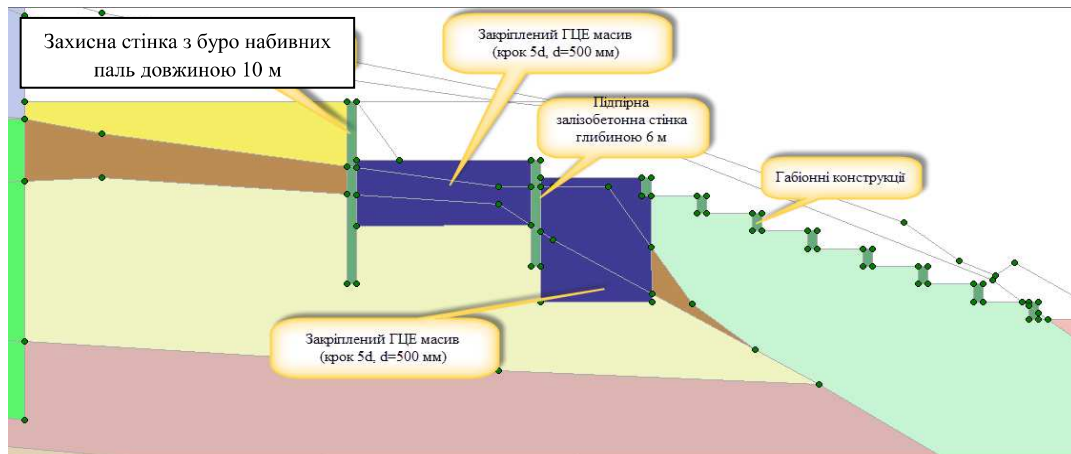


Рис. 8. Розрахункова СЕ схема інженерних заходів щодо мінімізації зсувних явищ

У результаті чисельного моделювання отримано коефіцієнт стійкості масиву ґрунту схилу $k_{st} = 1,474$, що цілком задовольняє вимоги норм [1, 2].

У разі подальшої забудови схилу доцільно повністю видалити ІГЕ-2 – делювіально-зсувні ґрунти (потужністю від 6 до 13 м). При цьому необхідно влаштувати підпірну стінку глибиною 17...25 м, стійкість якої додатково необхідно забезпечити анкерним кріпленням. Один із варіантів забудови схилу наведено на розрахунковій схемі (рис. 9). При цьому особливу увагу потрібно звернути на регулювання стоку ґрунтових вод. Тобто у разі забудови схилу для регулювання рівня ґрунтових вод й уникнення «баражного» ефекту рекомендовано влаштувати перед будівлею дренажну систему чи поглинаючі свердловини.

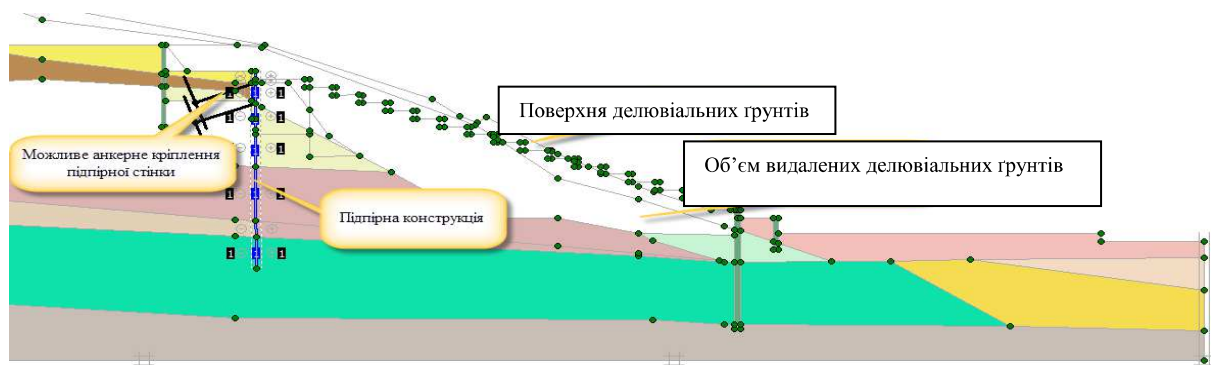


Рис. 9. Розрахункова СЕ схема інженерних заходів при забудові схилу

Висновки. Таким чином, за допомогою чисельного моделювання МСЕ проаналізовано НДС масиву ґрунту схилу на різних етапах його експлуатації. При цьому розроблено й чисельним моделюванням обґрунтовано раціональні інженерні заходи для ліквідації аварійного стану схилу, мінімізації зсувних явищ як у разі використання схилу як паркової зони, так і при подальшій його забудові.

Література

1. ДБН В.1-3-97. *Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення.* – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1998. – 72 с.
2. ДБН В.1.1-24:2009. *Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення.* – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 30 с.
3. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник* / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев, О.О. Петраков, В.Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
4. Великодний, Ю.Й. *Захист територій від зсувів: навч. посібник.* – Полтава: Скайтек, 2006. – 116 с.
5. *Досвід стабілізації зсувних схилів річкових долин* / [М.Л. Зоценко, Ю.Й. Великодний, В.А. Титаренко, М.І. Ланін, І.І. Ларцева] // *Світ геотехніки.* – 2010. – № 1. – С. 4 – 10.
6. *Bilfinger, J. General Report of TC 207. Foundations and Retaining Structures / J. Bilfinger // Proc. of the 18th Inter. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Challenges and Innovation in Geotechnics.* – France, Paris: Press and Ponts, 2013. – P. 1915 – 1927.
7. *Barhger, S. The Deep Excavations in the Odeon Tower in Monaco: The four outstanding elements in its design / S. Barhger // Proc. of the 18th Inter. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Challenges and Innovation in Geotechnics.* – France, Paris: Press and Ponts, 2013. – P. 1931 – 1934.

Надійшла до редакції 30.09.2013

*© М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко,
В.І. Марченко, А.М. Виноградова, О.В. Костенко, В.А. Титаренко*