

НЕРІВНОМІРНІ ОСІДАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ В ПРОЦЕСІ УЛАШТУВАННЯ СКЛЕПІНЧАСТИХ ТУНЕЛІВ З УРАХУВАННЯМ НАШАРУВАНЬ ҐРУНТІВ ПІВДЕННОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Карпюк І.А., Карпюк В.М.

Одеська державна академія будівництва та архітектури
м. Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ: Ця стаття присвячена визначенню екстремальних внутрішніх силових факторів в монолітних залізобетонних оправах склепінчастих тунелів, знайдених за допомогою чисельного планованого експерименту з використанням сучасного програмного комплексу «PLAXIS-8».

АННОТАЦИЯ: Эта статья посвящена определению экстремальных внутренних силовых факторов в монолитных железобетонных оправах сводчатых туннелей, найденных с помощью численного планирования эксперимента с использованием современного программного комплекса «PLAXIS-8».

ABSTRACT: This article focuses on the definition of extreme internal power factors in monolithic reinforced concrete frames vaulted tunnels planned for the numerical experiment using modern software system «PLAXIS-8».

КЛЮЧОВІ СЛОВА: склепінчастий тунель, оправа, загальні та додаткові осідання поверхні землі, математичні моделі.

ВСТУП

При будівництві підземної споруди - тунелю глибокого розташування в ґрунтах середньої міцності здійснюється виймання ґрунту прохідницьким комбайном та влаштування, слідом за цим, оправи тунелю. Досвід показує, що площа поперечного перерізу тунелю, підкріпленого оправою, завжди є меншою від площі зробленої печери - виїмки в ґрунті. І хоча будівельниками приймаються заходи щодо заповнення цих шпарин, все ж

не вдається уникнути перерозподілу напружень і деформацій ґрунту в ході його будівництва. З метою уникнення негативних наслідків, пошкоджень існуючих будівель і фундаментів на поверхні землі необхідно, з одного боку, визначати природні, додаткові і загальні осідання окремих її точок, прогнозувати ці ефекти і визначати внутрішні зусилля в оправах тунелів, а з іншого боку, приймати відповідні ефективні заходи. Такий аналіз може бути виконаний як аналітичними, так і чисельними методами, зокрема за допомогою програмного комплексу PLAXIS-8 [1 - 3]. Точні методи носять поки що досить умовний характер і потребують вдосконалення.

Мета публікації полягає у вивченні впливу конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу на величину осідань поверхні землі в процесі облаштування склепінчастих тунелів в ґрунтових умовах півдня України для подальшої їх оптимізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Числові експерименти по дослідженню взаємодії ґрунтів основи пальових фундаментів та фундаментної плити будівлі зі склепінчастою оправою тунелів (рис. 1.) виконані із застосуванням математичної теорії планування експерименту, що дозволяє теоретично обґрунтовано встановити мінімально необхідну кількість та склад числових експериментів для отримання достатньо повної інформації про якісний і кількісний вплив дослідних факторів на вихідні параметри як зокрема, так і при їх взаємодії, чого не можна домогтися при використанні традиційної методики.

На підставі аналізу наявної апріорної інформації з літературних джерел і з урахуванням реальних нашарувань ґрунтів основи південного регіону України в якості дослідних обрані фактори (табл. 1): номінальний проліт склепінчастої оправи тунелю (X_1), рівень підземних вод (початок координат (рис. 1) від денної поверхні ґрунту по осі Y, фактор X_2), наведений тип ґрунтових умов характерного для південного регіону України нашарування (X_3), який інтегрально ураховує вплив питомої ваги ґрунту (γ_{unsat} або γ_{sat}), коефіцієнтів горизонтальної (k_x) та вертикальної (k_y) фільтрації (проникності), модуля Юнга (деформацій, E_{ref}), коефіцієнта Пуассона (ν), зчеплення (c_{ref}), кута внутрішнього тертя (φ) і ділатансії ψ ґрунту, а також коефіцієнта його пружного відпору і (K), що визначається за формулою:

$$T_{\text{red},j} = \sum_{i=1}^n (\gamma_{\text{sat},i} k_{x,i} k_{y,i} E_{\text{ref},i} \nu_i c_{\text{ref},i} \varphi_i \psi_i K_i) h_i / \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1)$$

де $\gamma_{sat,i}$ - питома вага насиченого водою i -того шару ґрунту, що змінюється в межах 18,0...21,5 кН/м³;

$k_{x,i}$ - коефіцієнт горизонтальної проникності (фільтрації) i -того шару ґрунту, що змінюється в межах від 0,01 до 1,60 м на добу;

$k_{y,i}$ - коефіцієнт вертикальної проникності i -того шару ґрунту, що змінюється в межах 0,01...1,60 м на добу;

$E_{ref,i}$ - модуль Юнга (деформацій) i -того шару ґрунту, що змінюється в межах від 1000 до 5000 кН/м²;

ν_i - коефіцієнт Пуассона i -того шару ґрунту, що змінюється в межах 0,26...0,38;

$C_{ref,i}$ - зчеплення i -того шару ґрунту, що змінюється в межах від 0,2 до 1400 кН/м²;

Характерний для південного регіону України розріз ґрунтового масиву свідчить про наявність чотирьох різних шарів. Верхній шар потужністю 13 м складається з лесового суглинку.

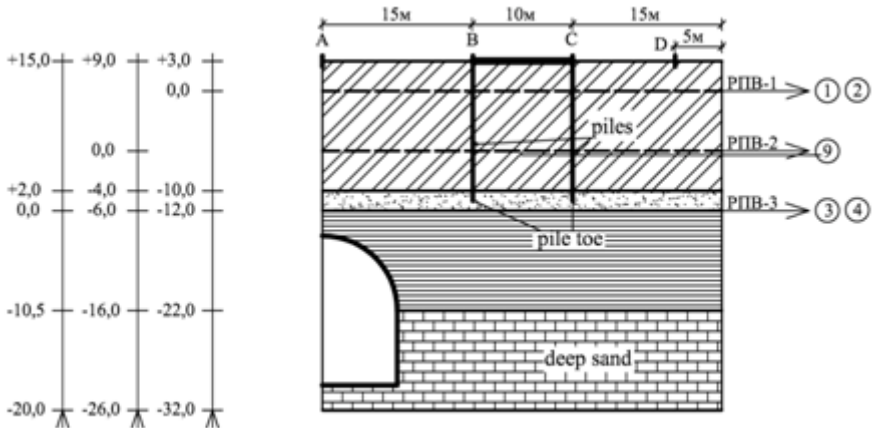


Рис. 1. Геометрія склепінчастого тунелю з номінальним прольотом 15 м, нашаруваннями ґрунтів та рівнями підземних вод для Одеського регіону в числовому експерименті

Під ним залягає шар дрібнозернистого піску потужністю 2,0 м, у який, як у несучий шар, заглиблені палі старої будівлі - пам'ятки архітектури та містобудування. Зміщення і осідання цих паль можуть викликати пошкодження будівлі-пам'ятки, що є вкрай небажаним. Нижче піщаного шару залягає глибинний шар червоно-бурих суглинків і глин потужністю, відповідно, 5,0; 7,5 і 10,0 м. Це один із шарів, в якому споруджується тунель. Інша частина тунелю розташовується в глибинному шарі вапняку-

черепашнику понтичного ярусу з включеннями перекристалізованого вапняку-черепашнику в покрівлі.

Цей нижній глибинний шар є досить жорстким. Тому тільки 5 м цього шару включені в скінчено-елементну модель. А нижня частина основи тунелю розглядається як абсолютно жорстка і моделюється відповідними граничними умовами.

Розподіл порового тиску води приймається гідростатичним. Рівень підземних вод може розташовуватися на 3,9 і 15 м нижче від поверхні землі (на позначці умовного нуля: $y = 0$).

Оскільки оправа тунелю і ґрунтові нашарування є більш-менш симетричними відносно вертикальної осі тунелю, то в даній моделі плоскої деформації враховуємо тільки одну (праву) половину оправи та ґрунтів основи. Від центру тунелю модель простягається на 30, 35 і 40 м в горизонтальному напрямку.

Таблиця 1

Дослідні фактори та рівні їх зміни

Фактори		Рівні зміни			Інтервал зміни
Натуральний вигляд	Кодований вид	«-1»	«0»	«+1»	
Проліт оправи тунелю, L , м	X_1	5	10	15	5м
Рівень підземних вод (початок координат від денної поверхні ґрунту), $T_{op,i}$, м	X_2	+15 ($T_{op,1}$; РПВ-3)	+9 ($T_{op,2}$; РПВ-2)	+3 ($T_{op,3}$; РПВ-1)	6м
Наведений тип ґрунтових умов, $T_{red,j}$, $[\text{кН}^4\text{град}^2/(\text{М}^7\text{добу}^2)]$	X_3	226000 ($T_{red,1}$)	435000 ($T_{red,2}$)	644000 ($T_{red,3}$)	209000 $\text{кН}^4\text{град}^2/(\text{М}^7\text{добу}^2)$

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЗГИНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ, ПОПЕРЕЧНИХ І ПОЗДОВЖНИХ СИЛ В ОПРАВАХ СКЛЕПІНЧАСТИХ ТУНЕЛІВ З МЕТОЮ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Відповідно до прийнятого плану в програмному комплексі PLAXIS-8 був реалізований числовий експеримент в 15-ох основних дослідках (точках) і одному додатковому, 16-му, зі збільшеним в 4 рази навантаженням від розташованого на поверхні будівлі із заміною в ньому дерев'яних паль на залізобетонні без зміни їх кроку.

В результаті обробки отриманих в числовому експерименті даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за

допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX, розробленої під керівництвом проф. Вознесенського В.А., отримано адекватні математичні моделі початкових, загальних та додаткових осідань (зрушень) поверхні землі над гірською виробкою (2, 6), під будівлею – пам'ятником архітектури (3, 4, 7, 8) та на віддалі 10м від неї. Зокрема, загальні осідання поверхні землі у зазначених точках можна охарактеризувати за допомогою наступних виразів:

$$\hat{Y}(\sum y_A) = 101 + 36X_1 + 10X_2 - 5X_3 - 30X_1^2, \text{мм}, \quad \nu = 12\%; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(\sum y_B) = 94 + 47X_1 + 21X_2 - 9X_3 - 7X_1^2 - 12X_2^2 + 8X_3^2 + 11X_1X_2 - 6X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 12\%; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(\sum y_C) = 21 + 41X_1 + 21X_2 - 8X_3 + 19X_1^2 + 9X_2^2 + 5X_3^2 + 18X_1X_2 - 6X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 26\%; \quad (4)$$

$$\hat{Y}(\sum y_D) = 22 + 35X_1 + 12X_2 - 7X_3 + 28X_1^2 - 3X_2^2 - 7X_3^2 + 9X_1X_2 - 5X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 21\%; \quad (5)$$

Додаткові осідання (зрушення) поверхні землі у цих же точках, зумовлені проходкою виробок під склепінчасті тунелі та їхнім оздобленням, можна представити наступними залежностями:

$$\hat{Y}(\Delta y_A) = 51 + 36X_1 + 6X_2 - 3X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 6\%; \quad (6)$$

$$\hat{Y}(\Delta y_B) = 63 + 44X_1 + 26X_2 - 2X_3 + 6X_1^2 - 5X_2^2 - 2X_3^2 + 12X_1X_2 - 5X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 12\%; \quad (7)$$

$$\hat{Y}(\Delta y_C) = 41 + 35X_1 + 26X_2 - 3X_3 + 20X_1X_2 - 5X_1X_3, \text{мм}, \quad \nu = 10\%; \quad (8)$$

$$\hat{Y}(\Delta y_D) = 26 + 22X_1 + 14X_2 - 2X_3 + 11X_1X_2 - 4X_1X_3 - 3X_2X_3, \text{мм}, \quad \nu = 9\%. \quad (9)$$

Геометрична інтерпретація наведених моделей може бути представлена на рис. 2, 3.

При середніх значеннях всіх дослідних факторів загальні осідання поверхні землі над гірською виробкою (т. А), біля ближнього (т. В) та дальнього (т. С) фасадів від неї, а також на відстані від нього (т. Д) складають, відповідно, 101 мм, 94 мм, 21 і 22 мм. При цьому, осідання всіх точок по відношенню до їх середніх значень збільшуються (рис. 3.1) по всьому фронту, відповідно, на 71, 100, 390 і 318% при збільшенні прольоту склепінчастих виробок. Аналогічний вплив на загальні осідання має рівень підземних вод. З його підвищенням від 15 до 3 м до денної поверхні осідання її точок по зазначеному профілю складають 20, 45, 200 і 109 мм. 3

погіршенням типу ґрунтових умов від $644 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{М}^7 \cdot \text{дніб}^2}$ до $226 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{М}^7 \cdot \text{дніб}^2}$ загальні осідання поверхні землі збільшуються на 10, 19, 76 і 64%. Більшість дослідних факторів мають нелінійний вплив на загальні осідання поверхні землі, а також взаємодіють між собою.

Залежність додаткових осідань (зрушень) поверхні землі (рис. 2) від зазначених факторів носить більш впорядкований характер.

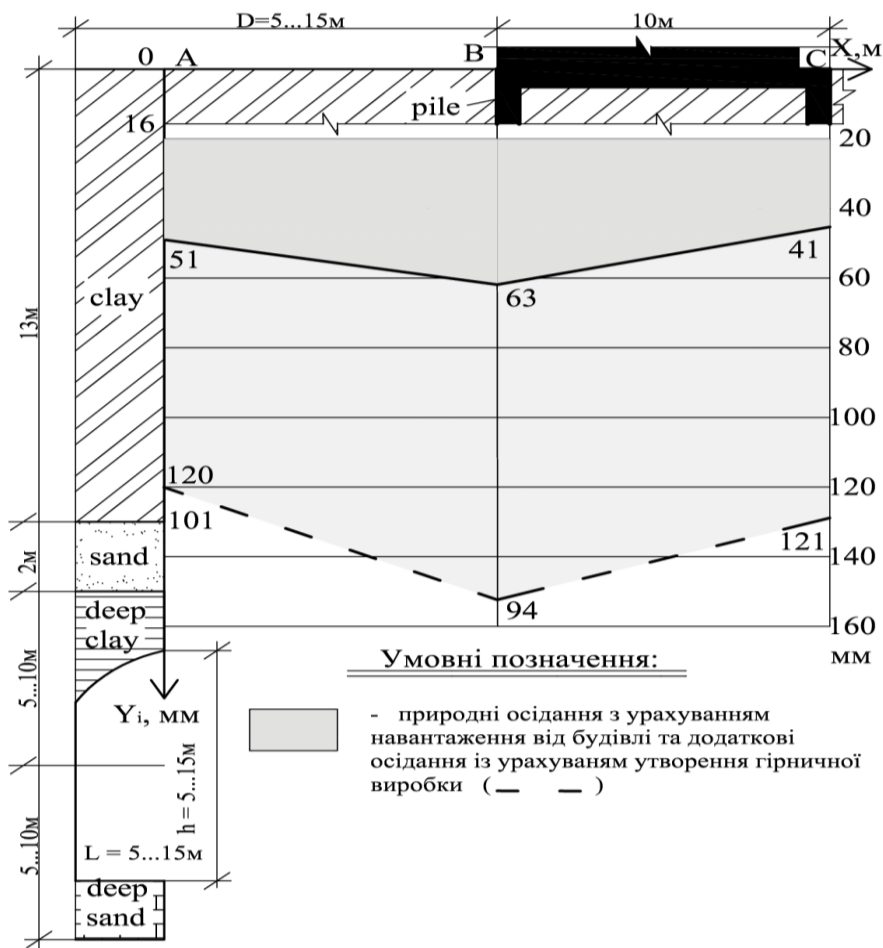


Рис. 2. Середні природні і додаткові осідання (зрушення) поверхні землі з урахуванням утворення підземної виробки в навантаженій основі (дослід №15)

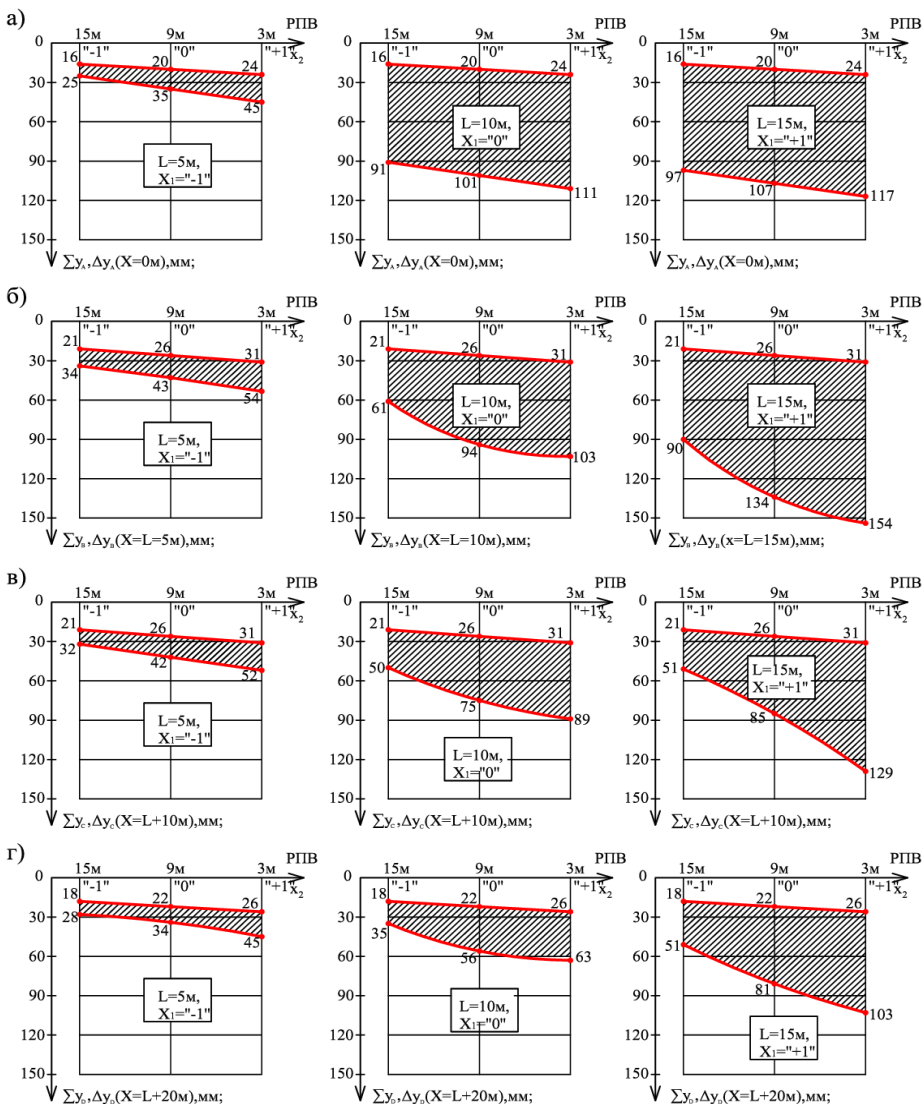


Рис. 3. Вплив прольоту склепіння, рівня підземних вод та ґрунтових умов на величину екстремальних значень згинальних моментів (а, б), поперечних сил (в, г) та стискаючих поздовжніх сил (д)

Зокрема, додаткові осідання поверхні землі над точками А, В, С, Д, зумовлені збільшенням прольотів підземних склепінчастих виробок від 5 до 15 м збільшуватимуться, відповідно, на 141, 140, 140 і 169%, при збільшенні рівня підземних вод від 15 до 3 м до поверхні землі на 24, 83, 127 на 108% , при погіршенні ґрунтових умов від $644 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{М}^7 \cdot \text{дйб}^2}$ до $226 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \cdot \text{град}^2}{\text{М}^7 \cdot \text{дйб}^2}$ - від 6 до 15%, при одночасному збільшенні прольоту склепіння і рівня підземних вод до 90%, при одночасному збільшенні прольоту склепіння й погіршенні типу ґрунтових умов - на 12...24% по всьому профілю.

ВИСНОВКИ

Наведенні математичні моделі (2)...(9) зручно використовувати для оцінки впливу того чи іншого фактору як зокрема, так і у взаємодії один з одним на величину загальних та додаткових осідань (зрушень) поверхні землі в характерних точках, а також для вирішення оптимізаційних задач, в яких використовуються достатньо математично обґрунтовані стохастичні залежності параметрів, що розглядаються, від зазначених дослідних факторів.

Збільшення рівня рівномірно розподіленого навантаження від розташованої праворуч від майбутнього тунелю будівлі в чотири рази (від $w=25$ до 100кНм/м), дослід №16 призведе до суттєвого збільшення загальних і додаткових (від 2 до 3 раз) осідань поверхні землі, обумовлених будівництвом склепінчастого тунелю.

Запропонована методика дозволяє досить швидко визначити основні та додаткові осідання поверхні землі без виконання громіздких розрахунків в ґрунтових умовах південного регіону України, а також спрогнозувати можливі негативні наслідки в процесі облаштування тунелів.

ЛІТЕРАТУРА

1. PLAXIS – інструмент інженера-геотехніка. Примеры расчетов // *CADmaster*. - 2002. - № 3. - С. 62-65.
2. Щекудов Е.В. Реализация современных расчетных методов при совершенствовании конструктивно-технологических решений подземных сооружений транспортного назначения / Е.В. Щекудов // *Технологии мира*, 2011. – 10 с.
3. Голубев А.И. Программный комплекс PLAXIS – эффективный инструмент для геотехнических расчетов транспортных сооружений / А.И. Голубев, А.В. Селецкий // *Дороги. Инновации в строительстве*. - 2011. - № 9. - С. 58-60.

4. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях [2-е изд. испр. и доп.] / В. А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 215 с.
5. Узагальнена оцінка впливу конструктивних чинників і чинників зовнішньої дії на внутрішні зусилля в залізобетонних оправах тунелів / [В.М. Карпюк, А.І. Менеїлюк, І.А. Карпюк, О.В. Сурду] // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-техн. зб. №2(17) – Вінниця, 2014. – С. 103-112.
6. Карпюк В.М. / Влияние геотехнических и конструктивных факторов на изгибные и осевые усилия в круговой обделке тоннелей, а также сдвиги поверхности земли / В.М. Карпюк, И.А. Карпюк, А.С. Варич // Вісник ОДАБА. – Вип. 56. - Одеса: ТОВ «Зовнішпреклам-сервіс», 2014. – С. 61-76.
7. Karpiuk Vasil, Karpiuk Irene, Meneylyuk Alexander. Internal efforts in shirt of circular tunnels and fallouts of terrene in the process of their arrangement in tense founding. French Journal of Scientific and Educational Research, 2014, No.2.(12), (Jule-December).Vol. IV. «ParisUniversityPress, Paris». - P. 554-571.
8. Karpiuk V.M., Karpyuk I.A. Moving the earth's surface the formation of underground excavation in the bases loaded. Proceedings of the International Academic Congress "Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic Oceans Countries". (Japan, Tokyo, 25 October 2014). Vol. II. "Tokyo University Press", 2014. – P. 403-413.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2016 р.