

## ВНУТРІШНІ ЗУСИЛЛЯ В СКЛЕПІНЧАСТИХ ОПРАВАХ ТУНЕЛІВ ГЛИБОКОГО РОЗТАШУВАННЯ

*Д.В.Макаринська, студентка гр. КПЦБ-330*

*Науковий керівник, - д.т.н., професор В.М.Карпюк*

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Дана наукова стаття присвячена визначенню екстремальних внутрішніх силових факторів в монолітних залізобетонних склепінчастих оправах тунелів за допомогою числового планованого експерименту з використанням сучасного програмного комплексу «PLAXIS-8».

Сучасний програмний комплекс «PLAXIS-8» може широко використовуватися у будівельній практиці для вирішення плоскої задачі (деформації) взаємодії ґрунтового середовища з оправою протяжної споруди - тунелю. Проте, широке і ефективне його використання стимується відносною складністю і громіздкістю основних і попередніх розрахунків, необхідністю урахувати чисельні властивості ґрунтів напруженої основи, розташування підземних вод, обрис та розміри зазначеної споруди.

Головною метою публікації є визначення екстремальних значень згинальних моментів, поперечних і поздовжніх сил в склепінчастих монолітних залізобетонних оправах тунелів для виводу відповідних математичних моделей, які дали б можливість встановити залежність параметрів, що досліджуються, від зазначених факторів як зокрема, так і у взаємодії, а також вирішувати оптимізаційні задачі при проектуванні вказаних тунелів в ґрунтових умовах південного регіону України.

Застосовувалися методи планування повного трьохфакторного експерименту ВЗ, чисельного моделювання взаємодії оправ зазначених тунелів з ґрунтами їх основ за допомогою ПК «PLAXIS-8», вивчення та аналіз літературних джерел, формулювання задач досліджень та відповідних висновків.

### **Результати досліджень**

Числові експерименти по дослідженню взаємодії ґрунтів основи палювих фундаментів та фундаментної плити будівлі зі склепінчастою оправою тунелів (рис.1.) виконані із застосуванням математичної теорії

планування експерименту, яка 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 з окрема, так і при їх взаємодії, чого не можна домогтися при використанні традиційної методики.

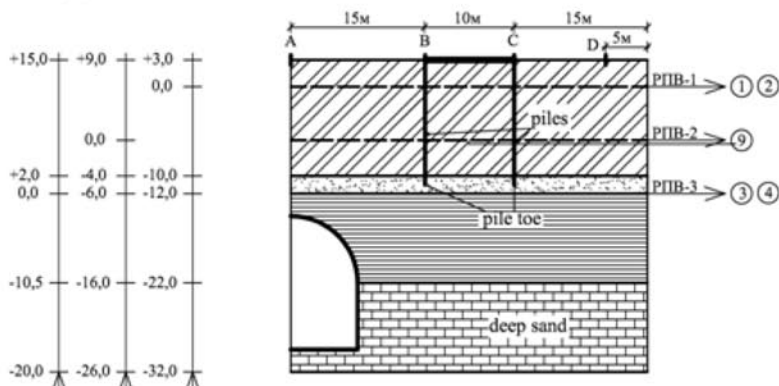


Рис.1 Геометрія склепінчатого тунелю з номінальним прольотом 15м, нашаруваннями ґрунтів та рівнями підземних вод для Одеського регіону в числовому експерименті

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 урахує вплив питомої ваги ґрунту ( $\gamma_{unsat}$  або  $\gamma_{sat}$ ), коефіцієнтів горизонтальної ( $k_x$ ) та вертикальної ( $k_y$ ) фільтрації (проникності), модуля Юнга (деформацій,  $E_{ref}$ ), коефіцієнта Пуассона ( $\nu$ ), зчеплення ( $c_{ref}$ ), кута внутрішнього тертя ( $\phi$ ) і ділатансії  $\psi$  ґрунту, а також коефіцієнта його пружного відпору ( $K$ ), що визначається за формулою:

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

де  $\gamma_{sat,i}$  - питома вага насиченого водою і-того шару ґрунту, що змінюється в межах 18,0...21,5кН/м<sup>3</sup>;  $k_{x,i}$  - коефіцієнт горизонтальної проникності (фільтрації) і-того шару ґрунту, що змінюється в межах від 0,01 до 1,60м на добу.;  $k_{y,i}$  - коефіцієнт вертикальної проникності і-того шару ґрунту, що змінюється в межах 0,01...1,60м на добу;  $E_{ref,i}$  - модуль

Юнга (деформацій)  $i$ -того шару ґрунту, що змінюється в межах від 1000 до 5000 кН/м<sup>2</sup>;  $\nu_i$  - 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/м<sup>2</sup>;  $\varphi_i$  - кут внутрішнього тертя  $i$ -того шару ґрунту, що змінюється в межах 15...40°;  $\psi_i$  - кут ділатансії  $i$ -того шару ґрунту, що змінюється в межах від 0,01 (фактично, 0) до 0,30°;  $K_i$  - коефіцієнт пружного відпору  $i$ -того шару ґрунту, який змінюється в межах від 70 до 250 кН/м<sup>2</sup>.

Таблиця 1. Дослідні фактори та рівні їх зміни

Фактори		Рівні зміни			Інтервал зміни
Натуральний вигляд	Кодований вид	«-1»	«0»	«+1»	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
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, $T_{red,j}$ , [кН <sup>4</sup> град <sup>2</sup> /(М <sup>7</sup> добу <sup>2</sup> )]	$X_3$	226000 ( $T_{red,1}$ )	435000 ( $T_{red,2}$ )	644000 ( $T_{red,3}$ )	209000 кН <sup>4</sup> град <sup>2</sup> / (М <sup>7</sup> добу <sup>2</sup> )

**Аналіз математичних моделей екстремальних згинальних моментів, поперечних і поздовжніх сил в оправах склепінчастих тунелів з метою їх мінімізації**

Відповідно до прийнятого плану в програмному комплексі PLAXIS-8 був реалізований числовий експеримент в 15-тьох 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 експериментів даних, вилучення незначимих та перерахунку тих коефіцієнтів, що залишилися, за допомогою ефективної комп'ютерної програми COMPEX, розробленої під керівництвом проф. Вознесенського В.А., отримані адекватні математичні моделі екстремальних значень внутрішніх зусиль в залізобетонних оправах склепінчастих тунелів різних прольотів, висот, улаштованих в різних ґрунтових (рис. 2) умовах, характерного для південного регіону України нашарування за наявності високих рівнів підземних вод. Зокрема, величина найбільших стискаючих поздовжніх сил може бути охарактеризована:

$$\hat{Y}(N_{\min}) = -(1621 + 941X_1 + 148X_2 + 88X_1^2 + 70X_1X_2), \text{кН/м}, \quad \nu = 5\%. \quad (2)$$

Екстремальні значення поперечних сил (рис. 3.1, в, д) в оправах зазначених тунелів можуть бути представлені:

$$\hat{Y}(Q_{\min}) = -(1443 + 952X_1 + 144X_2 + 155X_1^2 + 71X_1X_2), \text{кН/м}, \quad \nu = 5\%; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(Q_{\max}) = 814 + 694X_1 + 151X_2 - 20X_3 + 303X_1^2 + 33X_2^2 + 94X_1X_2, \text{кН/м}, \quad \nu = 12\%. \quad (4)$$

Визначальні для розмірів та армування як самих тунелів, так і товщин їхніх оправ найбільші від'ємні (що розтягують зовнішні волокна вузла з'єднання лотка і стіни) а також додатні (що розтягують внутрішні волокна посередині лотка) значення згинальних моментів мають вигляд:

$$\hat{Y}(M_{\min}) = -(1115 + 1544X_1 + 310X_2 - 38X_3 + 677X_1^2 + 249X_1X_2 - 491X_1X_3), \text{кН}\cdot\text{м/м}, \quad \nu = 6\%; \quad (5)$$

$$\hat{Y}(M_{\max}) = 1284 + 1488X_1 + 312X_2 - 56X_3 + 472X_1^2 + 38X_2^2 + 303X_1X_2, \text{кН}\cdot\text{м/м}, \quad \nu = 5,3\%; \quad (6)$$

Аналіз математичних моделей (2)...(6) показує, що найбільший вплив на вихідні параметри несучої здатності монолітної залізобетонної склепінчастої оправ має її проліт ( $X_1$ ), потім рівень підземних вод ( $X_2$ ), і, на останок, тип ґрунтових умов ( $X_3$ ). Отже, екстремальні значення поздовжньої стискаючої сили, поперечних сил та згинальних моментів зростають по відношенню до їх середніх значень при збільшенні прольоту зрізу  $L$  від 5 до 15 м і рівня підземних вод від 15 до 3 м від поверхні землі, відповідно, на 116...277% і 18...56%, а при погіршенні ґрунтових умов  $T_{\text{red}}$  від  $266 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \text{град}^2}{\text{М}^7 \times \text{дніб}^2}$  до  $644 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}^4 \text{град}^2}{\text{М}^7 \times \text{дніб}^2}$  - на 8...9%. Позитивні знаки при квадратичних ефектах  $X_1$  свідчать про те, що зі збільшенням прольоту склепіння за встановленими межами дослідні параметри несучої здатності оправ тунелів зростатимуть більш інтенсивно. Максимальні значення поперечних сил і згинальних моментів також зростатимуть, відповідно, на 3-4% при підвищенні рівнів підземних вод вище 3 м від денної поверхні грантів.

Усі внутрішні силові фактори зростатимуть за абсолютною величиною при одночасному збільшенні прольоту склепінчастої оправ та підвищенні рівня підземних вод, відповідно, від 4,3 до 23,6%.

Збільшення рівномірно розподіленого навантаження від розташованої праворуч від майбутнього тунелю будівлі в чотири рази (від =25кН/м/(м.п.) до 100кН/м/(м.п.) призведе до збільшення внутрішніх зусиль в склепінчастих оправах тунелів в А, В, С і Д, відповідно, на  $238 \frac{\text{кН/м}}{\text{м}}$ ;  $221 \frac{\text{кН/м}}{\text{м}}$ ;  $212 \frac{\text{кН/м}}{\text{м}}$ ;  $298 \frac{\text{кН/м}}{\text{м}}$ ;  $351 \frac{\text{кН/м}}{\text{м}}$ , тобто в 1,15; 1,21; 1,24 і 1,30 раз при нульових (середніх) значеннях дослідних факторів.

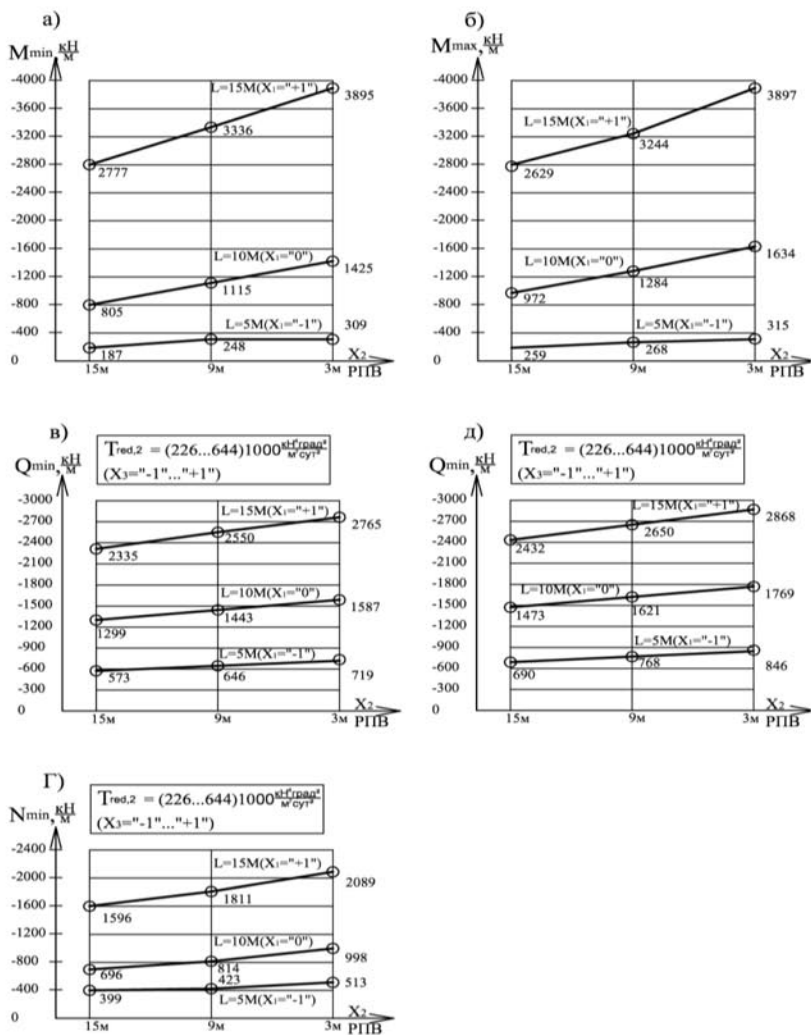


Рис.2 Вплив прольоту склепіння, рівня підземних вод та ґрунтових умов на величину екстремальних значень згинальних моментів (а, б), поперечних сил (в, г) та стискаючих поздовжніх сил (д)

## *Висновки*

Наведені математичні моделі (2) ... (6) зручно використовувати як для оцінки впливу того чи іншого фактора як зокрема, так і у взаємодії один з одним на величину внутрішніх зусиль в оправі тунелів, осідання поверхні землі, а також для вирішення оптимізаційних задач, в яких використовуються математично обґрунтовані стохастичні залежності розглянутих вихідних параметрів від зазначених дослідних факторів.

Збільшення рівномірно розподіленого навантаження від розташованої праворуч від майбутнього тунелю будівлі в чотири рази (від  $w = 25 \text{ кНм / м}$  до  $100 \text{ кНм / м}$ , дослід №16) призведе до збільшення сумарних осідань поверхні землі, обумовлених будівництвом тунелю, -

в 4 ... 6 раз, що може спровокувати пошкодження самої будівлі, прилеглого дорожнього полотна і рейкових шляхів.

Запропонована методика дозволяє досить швидко визначати внутрішні зусилля в оправі тунелю при його проектуванні та осідання поверхні землі без виконання громіздких розрахунків в ґрунтових умовах південного регіону України, а також спрогнозувати можливі наслідки в процесі його прокладки.

## *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. - 10с.
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/ В. А. Вознесенский [2-е изд. испр. и доп.]. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 215с.