

## АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ПРИ ЗЕМЛЕТРУСАХ

*Корнейко В.В. ДМ-21-21,  
Науковий керівник: к.т.н., доц. каф. МКБМ Смолянчук Н.В.  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Підземні споруди є невід'ємною частиною інфраструктури сучасних міст і використовуються як транспортні мережі, підземні стоянки, сховища тощо. Проектування таких споруд завжди є складним, із врахуванням великої кількості індивідуальних особливостей регіону умов будівництва. Особливо складними є регіони з підвищеною сейсмічною активністю через те, що таке стихійне лихо, як землетрус, відбувається миттєво та продовжується невеликий проміжок часу. Отже споруди, збудовані в районах, з підвищеною сейсмічною активністю повинні витримувати сейсмічні навантаження.

Відомо, що тунелі, як і інші підземні споруди, менш схильні до руйнувань при землетрусах, ніж наземні конструкції. Тим не менш, сейсмічними впливами на тунелі не можна нехтувати. Підчас недавніх сильних землетрусів, деякі підземні конструкції зазнали серйозних пошкоджень і навіть були зруйновані [1].

Аналіз пошкоджень конструкцій, спричинених землетрусами, є важливим завданням сучасної науки, оскільки дозволяє критично підійти до проектування нових споруд.

Велика кількість даних про руйнування, які спостерігаються в тунелях при землетрусах [2], дозволило класифікувати види руйнувань та виділити три типи підземних споруд, які поведуться по-різному під час землетрусів:

- тунелі, побудовані закритим способом;
- тунелі, побудовані відкритим способом;
- сталеві та пластикові трубопроводи.

Було встановлено, що пошкодження тунелів відбувається внаслідок однієї або комбінації кількох наступних причин:

- пошкодження, спричинені руйнуваннями навколишнього ґрунту, такими як розрідження або зсуви в тунельних порталах (передбачити можливі пошкодження можна за допомогою геомоніторингу);
- пошкодження від зміщення у зоні розлому (можливо попередити, застосовуючи спеціальні міри сейсмосахисту);
- пошкодження через коливання ґрунту, що виникають при поширенні сейсмічних хвиль.

Підземні споруди можуть зазнавати три види деформації при сейсмічному впливі: поздовжні деформації (стискання і розтягування), згинальні деформації та деформації зсуву. Пошкодження тунелів залежить від параметрів землетрусу, характеру деформацій масиву ґрунту біля тунелю та особливостей конструкції тунельної оправи. Залежно від співвідношення жорсткості тунельної оправи і масиву ґрунту тунель буде або деформуватися разом з масивом ґрунту, або чинити опір деформаціям. Якщо жорсткість тунелю перевищує жорсткість середовища, у зоні контакту в ґрунті може утворитися пластична зона.

Розглянемо окремі випадки пошкоджень підземних споруд.

Якщо тунелі перетинають зони активних розломів, виникає руйнування тунельних конструкцій при зсуві (рис.1).

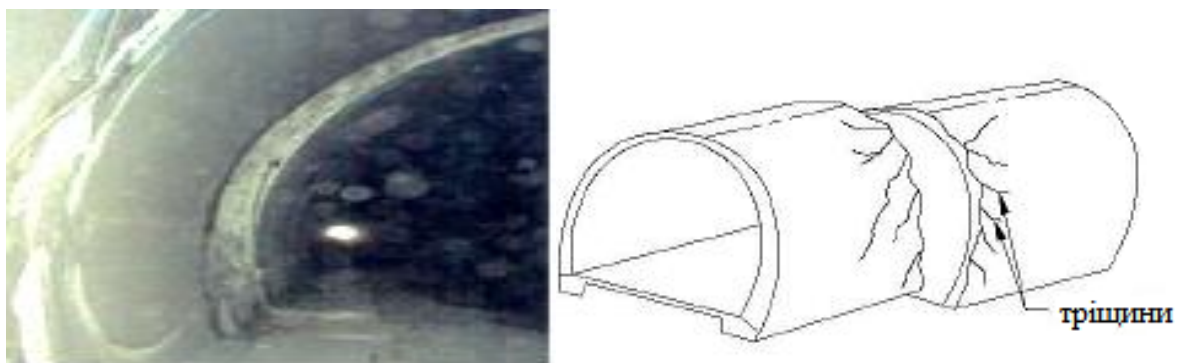


Рисунок 1 – Руйнування тунелю при зсуві ґрунту в зоні розлому

Відомо, що найбільшу небезпеку для тунельних конструкцій представляють великі зсуви ґрунтових масивів, що виникають внаслідок

нестійкості ґрунтових умов (наприклад, розрідження, зсуви) або зсувів ґрунту по розломах. Такі пошкодження при землетрусах зазнали такі тунелі, як: тунель Інаторі при землетрусі 1978 р.; гідротехнічний тунель під час землетрусу Наганокен-Сейбу у 1984 р.; залізничний тунель Райт під час землетрусу у Сан-Франциско 1906; тунель Болу під час землетрусу 1999 року у Туреччині [3]; тунель Шиганг під час землетрусу Чи-Чи 1999 року на Тайвані [4] та інші. Нажаль, неможливо розрахувати тунелі, щоб вони витримували великі зміщення ґрунту, але можливо прокласти трасу таким чином, щоб вона не знаходилася в зоні розлому, заглибити тунель на небезпечну глибину, видалити чи замінити жорсткі ґрунти навколо тунелів, стабілізувати ґрунт.

Руйнування тунелів при обваленні відкосів відбуваються тоді, коли тунель розташований паралельно зсувонебезпечного схилу (рис.2). Посилення сейсмічних хвиль при землетрусі відбувається через відбиття від вільної поверхні схилів, що призводить до руйнувань. Причому тунелі у цьому випадку є концентраторами напружень.



Рисунок 2 – Руйнування тунельної оправи внаслідок обвалу укосу

Поздовжні тріщини у склепіннях тунелів та тріщини у стінах тунельних оправ, спрямовані вздовж осі тунелів, виникають при розповсюдженні поперечних хвиль під кутом  $45^\circ$  до осі тунелю та при впливі поздовжніх хвиль уздовж осі тунелю. У деяких випадках такі впливи викликають руйнування склепінь тунелів (рис. 3).

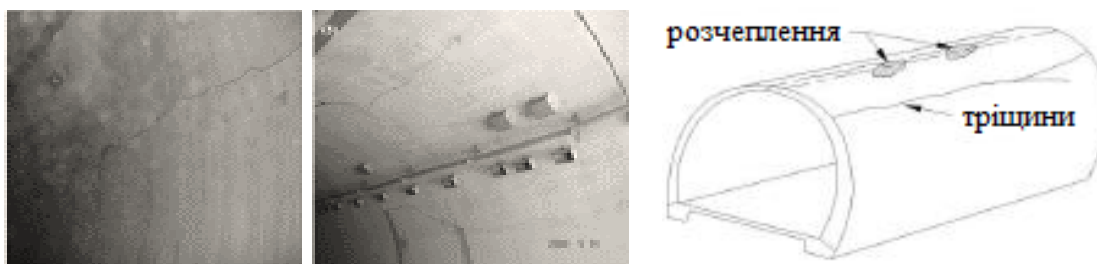


Рисунок 3 – Поздовжні тріщини та руйнування склепінь

Поперечні тріщини (рис. 4) виникають у тому випадку, коли в тунельній оправі відсутні або недостатньо міцні поздовжні зв'язки між кільцями. При поширенні поздовжньої хвилі вздовж осі тунелів у перерізах виникають напруження розтягування стиснення, які призводять до розкриття тріщин.



Рисунок 4 – Поперечні тріщини

Окрім поперечних і поздовжніх тріщин можуть утворюватися і похилі тріщини, які зазвичай нахилені під кутом  $30-60^\circ$  до горизонту. Тріщини з'являються на одному боці тунелю і перериваються на границях кілець (рис.5).



Рисунок 5 – Похилі тріщини

При деяких впливах відбувається руйнування лоткової частини тунельної оправи, яке являє собою протяжні тріщини, а також хвилеподібні деформації поверхні основи (рис. 6). Такі деформації можуть мати велику протяжність та великі амплітуди вертикальних переміщень.

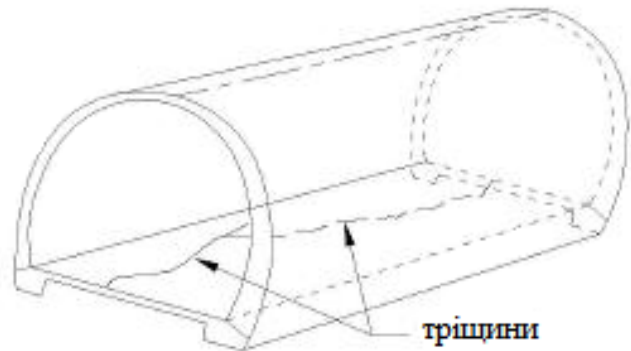


Рисунок 6 – Тріщини в лотковій частині тунелю

Деформація стін (рис. 7) відбувається через зменшення розмірів зворотного склепіння внаслідок його руйнування. Таке пошкодження оправи призводить до деформації бічних стін, а також виникненню численних тріщин у бетонній оправі.



Рисунок 7 – Деформація стін

Дуже часто тріщини розвиваються біля різного роду ніш: вентиляційних, пожежних та інше (рис. 8). Зазвичай ці тріщини мають довжину в декілька десятків сантиметрів. Однак, у деяких випадках при великих нішах, тріщини можуть простягатися в обидві сторони і об'єднуватися.

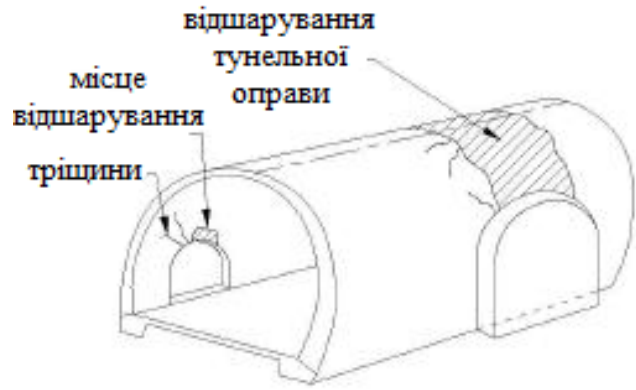
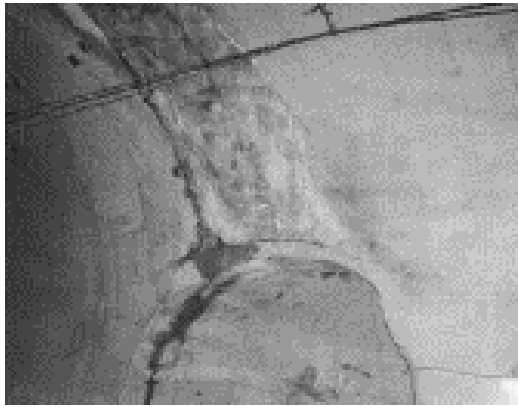


Рисунок 8 – Тріщини біля ніш

Окрім тунелів колового або склепінчастого обрисів, необхідно звернути увагу на руйнування тунелів прямокутного поперечного перерізу. Більшість таких тунелів – це тунелі дрібного закладення, які будуються відкритим способом.

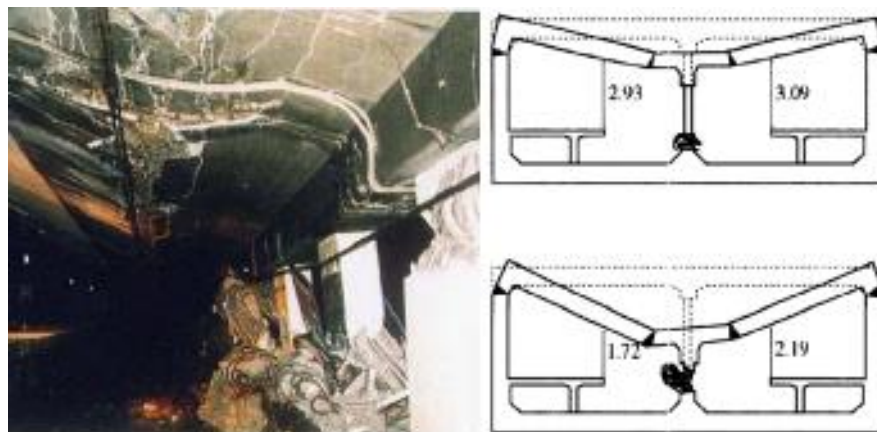


Рисунок 9 – Пошкодження оправи прямокутного перерізу  
(станція метро Дайкай у Кобе, Японія, 1995 р.)

При землетрусах в них ушкоджуються колони, а також з'єднання в верхніх та нижніх кутах тунельних опор. Аналіз ушкоджень (рис. 9) показує, що коли конструкція отримала велткі деформації зсуву під час землетрусу, відбувся перерозподіл напружень, що призвело до руйнування центральних колон, обвалення перекриттів та осідання ґрунту над тунелем [5].

Аналізуючи руйнування тунелів при можливому сейсмічному впливі, можна зробити висновок про необхідність розглядати характеристики ґрунту

навколишнього масиву. При розрахунках тунелів на сейсмостійкість застосовуються аналітичні та чисельні методи аналізу, які закладені у різноманітні програмні комплекси.

### Перелік посилань

1. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I-C.. Seismic design and analysis of underground structure. Tunn. Undergr. Sp.Technol. 16, 2001, 247–293. URL: [https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/download/118\\_315dce9c4c65ed8e9c8385d1418278e8](https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/download/118_315dce9c4c65ed8e9c8385d1418278e8) (дата звернення: 03.04.2023).
2. G. Lanzano, E. Bilotta, G. Russo. Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods. DIGA, 2008. URL: [https://www.academia.edu/3142588/Tunnels\\_under\\_seismic\\_loading\\_a\\_review\\_of\\_damage\\_case\\_histories\\_and\\_protection\\_method](https://www.academia.edu/3142588/Tunnels_under_seismic_loading_a_review_of_damage_case_histories_and_protection_method) (дата звернення: 03.04.2023).
3. Kontogianni V., Stiros S. Earthquakes and Seismic Faulting – Effects on Tunnels, Turkish Journal on Earth Sciences, Vol. 12, 2003, pp. 153-156.
4. Z.Z. Wang, Z. Zhang. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 45, 2013, p. 45–55.
5. Nakamura S., Yoshida N., Iwatate T. Damage to Daikai Subway Station During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and Its Investigation. Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering, 1996, pp. 287-295.