

DOI: 10.20535/2707-2096.7.2022.264271  
УДК 519.876.2

**Д. В. Юденко\***, аспірант

ORCID: 0000-0001-8617-6493

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: dimayuda@gmail.com

Стаття подана 20.09.2022; Стаття прийнята 28.10.2022

## РЕАКЦІЯ ТУНЕЛЮ НА РУХ ҐРУНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ

**Мета та завдання.** Мета: провести аналіз двох статей: «System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model» та «A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem», та виявити методи, які можна використовувати в написанні дисертації. Завдання: показати спрощену модель з використанням сполучених балок Бернуллі та зсуву, що підтримуються пружинами типу Вінклера та нелінійну конститутивну модель балочних елементів із циклічною спаданням. Оцінити пошкодження для розширеного динамічного аналізу геотехнічних елементів. Виявити методики та формули, які в подальшому можна буде використати в написанні дисертації.

**Методи дослідження:** ввести визначення моделі, її рішення у замкнутій формі для подальшого рівняння модальної характеристики та форми модифікації. Форми модифікації перевіряються за наслідками чисельних моделей. Потім показано алгоритм ідентифікації системи, який демонструє здатність відновити параметри моделі, в той час, коли записані часові інтервали прискорення впродовж тунелю порушуються через шум, а місцезнаходження датчиків змінюється. Представлена структура може використовуватися для первинного та простого відновлення реакції тунелю за наявності даних моніторингу або для планування кампаній моніторингу у новозбудованих або існуючих тунелях. Та нелінійна конститутивна модель балочних елементів, розроблена за-для інтегрування в комп'ютерний софт. Орієнтований на геотехнічний софт, задля подолання типових обмежень в структурному моделюванні. Розглядувана конститутивна модель здатна імітувати циклічну деградацію міцності та жорсткості. Окрім цього, це дозволяє оцінити деформацію конструкції. Поєднання не еластичності структурних елементів із нелінійною поведінкою ґрунтів у комп'ютерному софті, який спеціалізується на геотехнічних додатках. Він здатен сприяти подоланню розриву між геотехнічною та структурною спільнотою при спробі вирішити проблеми взаємодії ґрунту та конструкції.

**Основні результати:** в першому випадку був використаний простий генетичний алгоритм і запропонована спрощена модель. Було показано, що ідентифікація системи може бути зроблена для різних, змінних, умов. Модель була перевірена на двох різних землетрусах різної частоти. Також, параметрично, досліджений вплив розподілу датчиків вздовж тунелю. Результати тестів були спеціально скомп'ютовані через додавання білого шуму Гауса з дисперсією, який дорівнює тому, що спостерігалася під час руху землі. Було помічено, що для значень  $\alpha > 3,0$  (коли вплив зсувних променів є значним), параметри моделі можуть бути успішно відновлені. У другому випадку конститутивна модель довела, що добре працює також під динамічним навантаженням. Еволюція рівня жорсткості між конструкцією і ґрунтами є важливим аспектом динамічної проблеми, яку важко оцінити за допомогою стандартних методів. Модель була успішно використана для сейсмічного аналізу підземного тунелю, який дозволив оцінити вплив зміни невідповідності жорсткості між конструкцією та землею під час руху земної поверхні. Порівняння результатів стандартних рішень

закритої форми з літератури та чисельного моделювання показує те, що спрощені методи, які зазвичай використовуються на практиці, недооцінюють сейсмічні дії.

**Наукова новизна:** інший спосіб до параметричної ідентифікації системи використання спрощених моделей. У тунелях такі моделі складаються з балок на пружинах типу Вінклера, які бувають як аналітичні схеми так і чисельні. Однак сейсмічну реакцію ґрунту краще змодельовати використавши поперечну балку над пружиною Вінклера. Це дозволяє взаємодіяти між окремим пружинам, і не включати один з шарів незалежних пружин. У другому випадку валідація базується на чисельних і експериментальних тестах.

**Висновки та практичне значення.:** різні дані датчиків, і менша кількість датчиків, не призвели до якихось відмінностей у кінцевих результатах. Це показало, що положення датчика не є основним параметром для випадку чотирьох датчиків вздовж усієї довжини тунеля. Вони були закріплені на обох кінцях які були зазначені у статті.

**Ключові слова:** пружини Вінклера, ґрунт; ґрунт; модель; представлений алгоритм ідентифікації системи.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Підземні споруди менше піддаються до пошкоджень, які викликані землетрусами, бо тоді загальне прискорення та зміщення збільшуються на поверхні. Але через велику вартість будівництва, підземні споруди, зокрема тунелі, можуть бути різних форм: з вузькими ділянками на транспортних маршрутах. Якщо це хоча б трохи буде порушувати їхню функціональність, це може привести до довгострокових простоїв, прямих і непрямих витрат. Ці фактори мотивують до ретельного розгляду наслідків сейсмічних впливів під час проектування, будівництва та управління підземними спорудами (тунелями). [1]

Використання систем моніторингу стану конструкцій, в нашому випадку SHMS, може мати користь з точки зору підвищення стійкості тунелів до сейсмічних впливів. [1]

В теорії приведено дві основних формули для оцінки вихідних даних SHMS, задля системної ідентифікації: параметричний та непараметричний. У першому випадку поведінка оцінюється з використанням зібраних даних. При параметричній ідентифікації системи формується модель тунелю. Його параметри коригуються стільки, поки не буде відтворено відгук. Для цього можна використовувати чисельні моделі, але збіжність до знаходження правильного рішення займає багато часу, але в тому випадку, якщо це можливо. [1]

В іншому випадку більшість наявних обчислювальних сервісів спеціалізуються: або для структурних застосувань (наприклад, SEISMOSTRUCT, RUAUMOKO), або для геотехнічних застосувань (наприклад, DYNAFLOW, PLAXIS, FLAC). [2] Тоді як форми здатні з точністю відтворювати нелінійну реакцію структурних елементів, вони погано моделюють нелінійну поведінку ґрунту, особливо під час землетрусного навантаження. Але, останні налаштовані навпаки: вони базуються на моделюванні реакції ґрунту, але дуже грубі у відтворенні циклічної поведінки структурних параметрів та елементів [2].

Здатність змодельовати зміну невідповідності жорсткості між структурними елементами і ґрунтом, під час руху ґрунту, являється ключовим аспектом для оцінки кінематичної складової при прораховуванні задач «SSI» [2].

**Постановка завдання.** Порівняти 2 статті: спрощену модель з використанням сполучених балок Бернуллі та зсуву, що підтримуються пружинами типу Вінклера, для системної ідентифікації тунелів, схильних до рухів ґрунтів, викликаних землетрусами. Та показати просту конститутивну модель для нелінійних балкових елементів, яка зроблена для інтеграції в комп'ютерні програми, які орієнтуються на геотехнічне застосування. Спеціально для виконання задач «SSI» [2].

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Спершу, розглянемо статтю «System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model»[1]. В ній була розроблена спрощена модель, яка вміщує пружини Вінклера, які тримають балку Бернуллі та поперечну балку. [1] Вони, в свою чергу, з'єднані з вісьовими ланками так, що вони піддаються тим самим поперечним переміщенням у напрямку  $y$  (по вертикалі), як показано на рис. 1. Модель побудована на наступних припущеннях:

- реакція є суто еластичною, яка допускає накладання;
- осьові навантаження вздовж осі тунелю не враховуються, єдине навантаження пов'язане з рухом ґрунту;
- рух ґрунту в далекому полі вздовж земляного полотна однаковий по довжині тунелю;
- відсутня взаємодія між осьовими та поперечними зсувами або між зміщеннями поза площиною, і тому реакція у цьому напрямку може бути накладена безпосередньо;
- вплив обертальної інерції не враховується;
- деформація поперечного перерізу згинальної балки відповідає гіпотезі Бернуллі;
- матеріали тунелю та земляного полотна є однорідними.

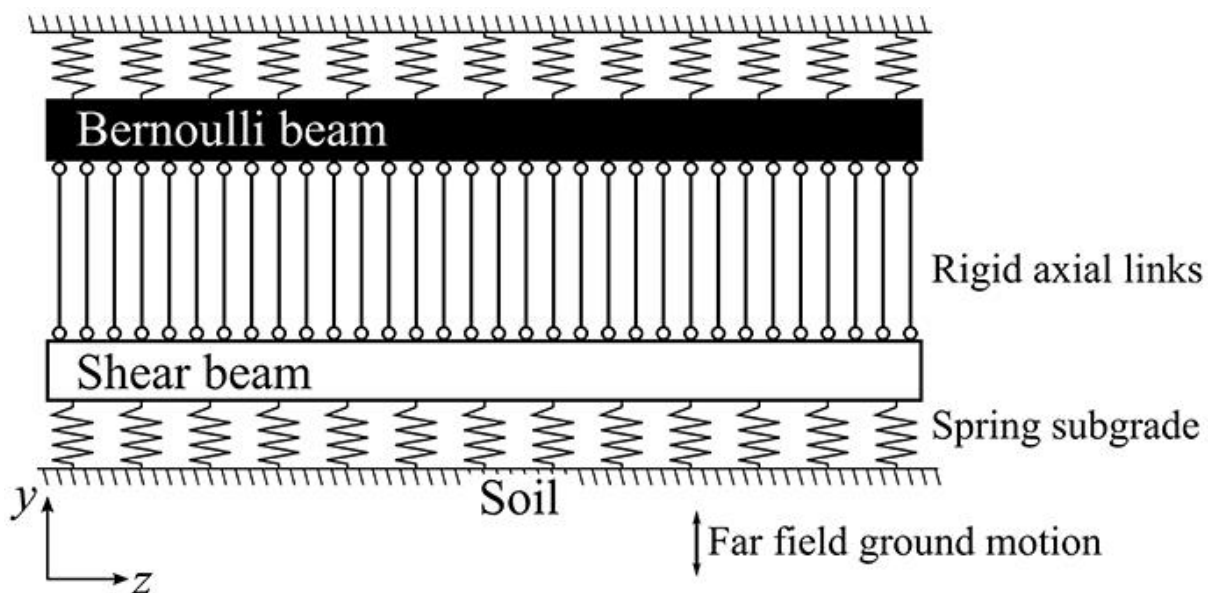


Рисунок 1 – Схема розробленої спрощеної моделі [1]

Рівняння руху, яке описує вібрацію моделі по наведених припущеннях:

$$EI \frac{d^4 u(z, t)}{dz^4} - AG \frac{d^2 u(z, t)}{dz^2} + \rho \frac{d^2 u(z, t)}{dt^2} + ku(z, t) = -\rho \frac{d^2 u_g(z, t)}{dt^2},$$

де:  $z$  — ордината вздовж довжини тунелю,  $t$  — час,  $u$  — вертикальний прогин тунелю,  $EI$  — жорсткість на згин балки Бернуллі,  $AG$  — жорсткість на зсув балки на зріз,  $k$  — реакція земляного полотна Вінклера модуль,  $\rho$  — одинична маса тунелю на довжину,  $u_g$  — позначає рівномірний вертикальний рух ґрунту під фундаментом у дальній зоні.

Спрощена модель, яка визначається за чотирма параметрами використовується задля ідентифікації системи в припущеннях. [1] Датчики мережі мають доступ для вимірювання фактичної реакції тунелю. Встановлення вірних значень для параметрів, що описують модель, виконана шляхом включення параметрів ідентифікації системи як частотної, так і в часовій області, описаної на рисунку 2.

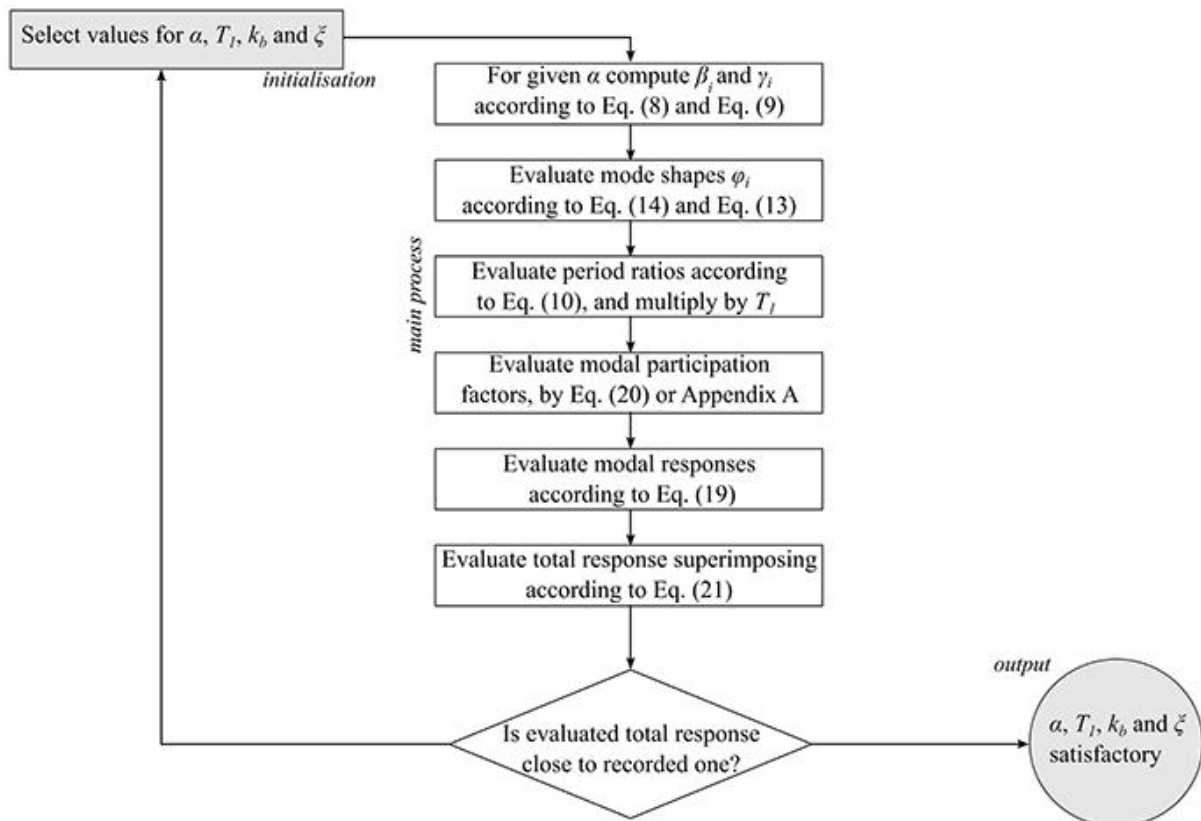


Рисунок 2 – Схема процесу визначення системи [1]

Процес починається з визначення початкового набору процесів і параметрів, який автоматично поновлюється до тієї пори, до-поки різниця між модельованим та відміряним відгуком в потрібних місцях не стане меншою за статичне значення. Взагалі, використовувати методи, які залежать від градієнта, є допустимим. Але, вони схильні давати локальні, аніж глобальні значення. [1] Альтернативою цьому є підбір евристичних методів, які імітують біологічні та фізичні явища для систематичного пошуку в області імовірних значень, що дозволяє здійснювати випадковий пошук за межами областей, де спостерігаються локальні мінімуми. Слід підкреслити, що евристичні алгоритми не дають гарантію досягнення абсолютного мінімуму; тож, звичайною практикою є критичний аналіз кінцевих результатів, які залежать від багаторазових запусків. У цій статті різниця квадратів між виміряними та прогнозованими історіями загального часу прискорення задається як цільова функція (OF), яка має бути мінімізована [1]:

$$OF = (\alpha, k_b, T1, \xi) = \sum_{j=1}^n [\mu T(\alpha, kb, T1, \xi, x_j) - \mu_{TM(x_j)}]^2$$

де:  $n$  – кількість записаних сумарних періодів часу прискорення ( $\mu_{TM}$ ) у місцях  $x_j$ .

Наступною розглядається стаття «*A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem*». В ній запропоновано нелінійну конститутивну модель балкових елементів, які добре підходять для обчислювання платформ, які мають наступні характеристики:

- 1) вони зорієнтовані на вирішення геотехнічних задач з обмеженими можливостями структурного моделювання;
- 2) використовуються в наукових дослідженнях і на практиці;
- 3) оснащені явними вирішувачами (наприклад, DYNAFLOW, FLAC, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS).

Використовувалися стандартні балки і пальові елементи програми FLAC-2D. [2] нелінійну поведінку було змодельовано тільки за допомогою моделі пластичності з

використанням простого закону пружно-ідеального пластичного гістерезису, без деформації міцності та жорсткості. Цей підхід використовується тільки для сталевих елементів. Був спеціально розроблений елемент вкладення для вирішення проблем тунелювання. Нелінійність матеріалу вираховується за допомогою, визначеної користувачем, огинаючої руйнування, яка змодифікована задля початкової діаграми взаємодії M-N. [2] Такий підхід розглядають як модернізацію балково-пальових елементів. Але, цього може бути недостатньо для динамічного аналізу, так як жорсткість залишається постійною під час циклічного навантаження. Реалізація конститутивної моделі використовує балкові елементи на основі стандартної формули Ейлера-Бернуллі з трьома ступенями свободи в кожному кінцевому вузлі. Ці вузли балочних елементів повинні бути закріплені безпосередньо в точках сітки і сприяти зсувним і осьовим напругам. Брус, який був прикріплений до сітки, повинен бути з'єднаний шпильками у вузлах з'єднання. [2] Вузли, які поєднують різні балки, передають згинальний момент між елементами конструкції, за винятком випадків, коли вони закріплені в цих вузлах. Але, вони завжди повинні бути з'єднані штифтами в місці з'єднання балки та сітки. В такому випадку, вузли структурних елементів можуть взаємодіяти із сіткою також за допомогою елементів поверхні. Беручи до уваги ці особливості, реалізація запропонованої моделі полягає у визначенні алгоритму відображення, який контролює міцність і жорсткість непружних зон кінцевої довжини, які визначають пластичну поведінку елементів палі та балки. Так як в явному розв'язанні змінні поля (тобто згинальний момент, обертання, вісьове навантаження, потреба в пластичності тощо) залишаються незмінними протягом одного кроку часу, у цьому інтервалі алгоритм призначає оновлену жорсткість і міцність на вигин зі змінних стану відповідно до правила гістерезису, представлені в наведеній статті [2].

Геометрія, яку треба вказувати для використання моделі, показана на рисунку 3.

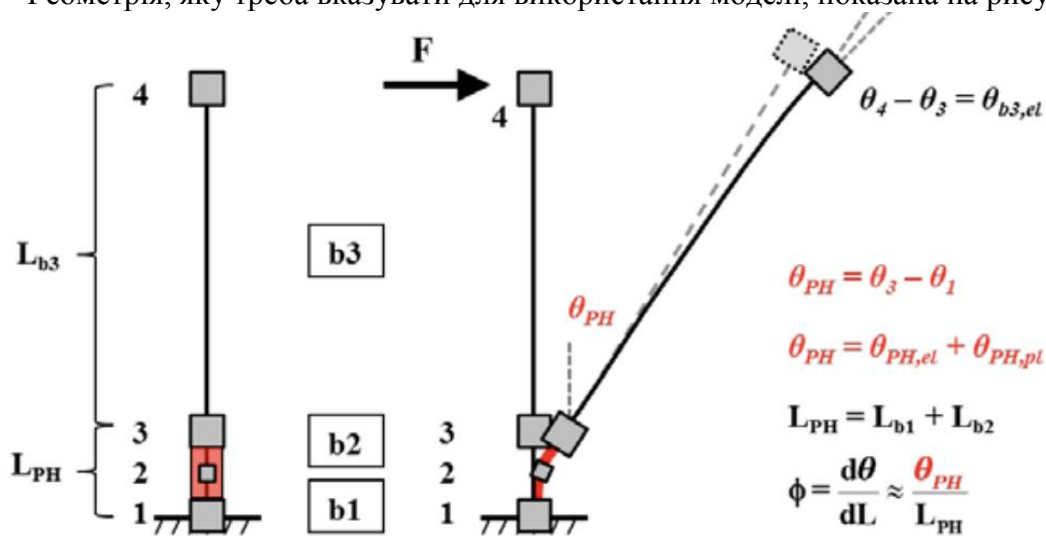


Рисунок 3 – Номенклатура для визначення непружних зон (червоним), необхідних для запропонованої моделі. [2]

## ВИСНОВКИ та практичне значення

У статті «System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model» показано використання спрощеної моделі для системної ідентифікації тунелів з врахуванням руху ґрунту, який спричиняється землетрусом. Модель використовує компоновані балки, які підпираються пружинами Вінклера. Вони піддаються однаковим вертикальним прискоренням [1].

Показана спрощена модель може бути правильно використана тільки за допомогою чотирьох параметрів: період першого режиму  $T1$ ; відношення  $\alpha$  жорсткості на згин до жорсткості на зсув; співвідношення  $k_b$  між жорсткістю земляної поверхні та жорсткістю балки на згин; загальний коефіцієнт  $\xi$  для кожного режиму [1].

Використання простого алгоритму і запропоновану спрощену модель показує, що ідентифікація системи може бути виконана для різних умов. Модель була перевірена на двох різних землетрусах різної частоти, а також параметрично досліджено вплив розподілу датчиків вздовж підземної споруди [1].

Різні поділи датчиків та менша кількість датчиків не показали істотних відмінностей у остаточних результатах. Це показує, що положення датчиків не є домінуючим параметром [1].

А у статті «A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem [2]» було показано реалізацію та перевірку нелінійної конститутивної моделі для балок. Порівняння результатів моделювання та стандартних рішень закритої форми підкреслює той факт, що методи, які використовуються в практиці, мають тенденцію знецінювати сейсмічні прояви [2].

Не дивлячись на те, що нова модель була використана в дослідженні статті до підземних споруд, зокрема тунелів, її формулювання є абсолютно повним [2]. Відповідно до специфікацій, приведених у наведеній статті, ця модель з легкістю застосовується для вивчення сейсмічних коливань надземних будівельних систем на глибоких фундаментах, палях, в рамках проектування, де в основі продуктивність, структурні пошкодження допускаються для системи фундаменту [2].

Взявши до уваги ці дві статті, та моделі вирішення питань сейсміки, до роботи над дисертацією будуть взяті обидва варіанти. Ці статті мають різні рішення для фіксації та вирішення питань з сейсмічними коливаннями, зокрема виявлення цих коливань. Зокрема, стаття A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem [2]» має більш обширне використання, та повноцінно підходить для використання у моїй роботі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Alonso-Rodriguez, N. Nikitas, J. Knappett, and G. Kampas, "System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model", 2018.  
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00039>
- [2] G. Andreotti, C. G. Lai, "A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem", 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0091-0>

**D. Yudenko\***, PhD student.,  
ORCID: 0000-0001-8617-6493

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author: [dimayuda@gmail.com](mailto:dimayuda@gmail.com)

Received 20.09.2022; Accepted 28.10.2022

### TUNNEL REACTION TO GROUND MOVEMENT USING A SIMPLIFIED MODEL

**Purpose and task.** Purpose: to analyze two articles: "System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model [1]" and "A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem", and identify methods that can be used in writing a dissertation. Task: to show a simplified model using coupled Bernoulli and shear beams supported by Winkler-type springs and a nonlinear constitutive model of beam elements with cyclic decay. Assess damage for advanced dynamic analysis of geotechnical elements. Identify methods and formulas that can be used later in writing a dissertation.

**Research methods:** introduce the definition of the model, its solution in closed form for the further equation of the modal characteristic and the form of modification. The forms of modification are verified by the results of numerical models. Then, a system identification algorithm is shown that demonstrates the ability to recover the model parameters when the recorded acceleration time intervals along the tunnel are perturbed by noise and sensor locations change. The presented framework can be used for initial and simple recovery of tunnel response in the presence of monitoring data or for planning monitoring campaigns in newly constructed or existing tunnels. The non-linear constitutive model of beam elements, developed for integration into computer software. Oriented to geotechnical software to overcome typical limitations in structural modeling. The degenerate constitutive model is capable of simulating the cyclic degradation of strength and stiffness. In addition, it allows to estimate the deformation of the structure. Combining the inelasticity of structural elements with the nonlinear behavior of soils in a computer software that specializes in geotechnical applications. It has the potential to help bridge the gap between the geotechnical and structural communities when attempting to solve soil-structure interaction problems.

**The main results:** in the first case, a simple genetic algorithm was used and a simplified model was proposed. It was shown that system identification can be done for different, changing, conditions. The model was tested on two different earthquakes of different frequencies. Also, parametrically, the influence of the distribution of sensors along the tunnel was studied. The test results were specifically compromised by the addition of white Gaussian noise with a variance equal to that observed during ground motion. It was observed that for values of  $\alpha > 3.0$  (when the effect of shear rays is significant), the model parameters can be successfully recovered. In the second case, the constitutive model proved to work well also under dynamic load. The evolution of the stiffness level between the structure and the soil is an important aspect of the dynamic problem, which is difficult to evaluate using standard methods. The model was successfully used for the seismic analysis of an underground tunnel, which allowed to evaluate the influence of the change in stiffness mismatch between the structure and the ground during the movement of the earth's surface. A comparison of the results of standard closed-form solutions from the literature and numerical simulations shows that the simplified methods commonly used in practice underestimate seismic actions.

**Scientific novelty:** another way to parametric system identification using simplified models. In tunnels, such models consist of beams on springs of the Winkler type, which are both analytical schemes and numerical. However, the seismic response of the soil is better modeled using a transverse beam over a Winkler spring. This allows interaction between individual springs, and not include one of the layers of independent springs. In the second case, validation is based on numerical and experimental tests.

**Conclusions and practical significance.:** different sensor data, and a smaller number of sensors, did not lead to any differences in the final results. This showed that sensor position is not the main parameter for the case of four sensors along the entire length of the tunnel. They were fixed at both ends which were mentioned in the article.

**Key words:** Winkler springs, soil; soil; model; system identification algorithm is presented.

## REFERENCES

- [1] A. Alonso-Rodriguez, N. Nikitas, J. Knappett, and G. Kampas, "System Identification of Tunnel Response to Ground Motion Considering a Simplified Model", 2018.  
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00039>
- [2] G. Andreotti, C. G. Lai, "A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem", 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0091-0>