



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-15-2021-6>

УДК (045)



ГОРОДЕЦЬКИЙ А. С.

Д-р техн. наук, професор, заступник директора з наукової роботи ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна, e-mail: info@liraland.com.ua тел.: +38 (050) 351 96 61



БАРАБАШ М. С.

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів, Національного авіаційного університету, директор ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна e-mail: bmari@ukr.net тел.: +38 (095) 286-39-90 ORCID: 0000-0003-2157-521X



ПИСАРЕВСЬКИЙ Б. Ю.

Аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів, Національного авіаційного університету, інженер-програміст ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна тел.: +38 (044) 590 58 85, e-mail: mikst1234@gmail.com ORCID: 0000-0002-1001-2879



ГЕНЗЕРСЬКИЙ Ю. В.

Канд. техн. наук., заступник директора ТОВ «ЛІРА САПР», м. Київ, Україна e-mail: yvg@liraland.com.ua тел.: +380952805315 ORCID: 0000-0001-6834-4203

МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СИСТЕМУ «НАДЗЕМНА СПОРУДА-ГРУНТ»

АНОТАЦІЯ

У статті розглядаються проблеми моделювання динамічних впливів «надземна споруда – ґрунтова основа» на прикладі будівлі, що розташована в м. Одеса. Розглянуто особливості моделювання необмеженого напівпростору ґрунту. У програмному комплексі ЛІРА - САПР запропоновано чисельну процедуру формування рівнянь руху та, як окремий випадок, рівнянь рівноваги, у задачах, де є необмежені області. Цю процедуру впроваджено у вигляді нових скінченних елементів, що дало можливість формувати гібридні моделі МСЕ/SBFEM і розв'язувати практично будь-які фізично лінійні та нелінійні динамічні задачі у часі методом підсистем. Описано принципи нових скінченних елементів, розроблених у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Ці скінченні

елементи імітують взаємодію між обмеженою областю ґрунту та іншою частиною напівпростору. В основі даного елемента лежить метод масштабування границі скінченного елемента. Для перевірки елементів вирішуються дві задачі. Перша задача розглядає обмежений ґрунт, куди вводяться розроблені граничні скінченні елементи. Друга задача розглядає ґрунт порівняно великих розмірів. Граничні умови не впливають на поширення хвилі (умовно може розглядатися як необмежений напівпростір) через розміри ґрунту. Результати чисельного експерименту свідчать про те, що застосування розроблених скінченних елементів дає можливість створювати моделі, які відтворюють реальні умови роботи конструкцій будівлі за динамічних впливів.



Виконано аналіз методів розрахунку на динамічні навантаження, що застосовуються у сучасному будівництві на прикладі реального об'єкта, розташованого у Комінтернівському районі Одеської області. При моделюванні сейсмічного впливу застосовуються реальні акселерограми, записані під час землетрусу на будівельному майданчику об'єкта, що розглядається. Представлено методику, що дозволяє моделювати поведінку конструктивної системи будівлі або споруди на основі розроблених та реалізованих у програмному комплексі LIRA-SAPR скінченних елементів, що моделюють згасання коливань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: динамічний вплив, метод скінченних елементів, аналіз динамічної взаємодії "споруда - ґрунт", поширення хвилі в необмеженій області, необмежена область, метод масштабування граничних скінченних елементів, ПК LIRA-SAPR.

MODELLING OF EARTHQUAKE LOAD ONTO THE 'STRUCTURE-SOIL' SYSTEM

ABSTRACT

The paper focuses on simulation of dynamic "structure – soil" interaction (the building located in Odessa is taken as an example) and unbounded soil half-space. Principles for new finite elements developed in LIRA-SAPR software are described. These finite elements simulate the interaction between bounded domain of soil and the rest part of the half-space. The LIRA-SAPR software offers a numerical procedure for the formation of equations of motion and, as a partial case, equilibrium equations in problems with infinite domains. This procedure implemented in the form of new finite elements, which made it possible to form hybrid FEM / SBFEM models and solve almost any physically linear and nonlinear dynamic problems in time by the substructure method. The scaled boundary finite-element method governs these elements. To verify the elements, two problems are solved. The first problem considers the bounded soil where the developed boundary finite elements are introduced. The second problem considers the soil of a relatively large size. Boundary conditions do not influence the wave propagation (conditionally may be treated as unbounded half-space) due to dimensions of soil size. Results of numerical experiment indicate that developed finite elements enable the user to generate models that simulate the real service conditions of building structures under dynamic loads.

The analysis of methods of calculation on dynamic loadings used in modern construction is executed. The real object located in the Comintern district of Odessa region is taken as an example. When the earthquake loads are simulated, the authors use real accelerograms that were taken during the

earthquake at the construction site of the object. Described technique enables the user to simulate behavior of the structural system of a building based on the finite elements developed and implemented in LIRA-SAPR program; these finite elements simulate vibration damping.

KEYWORDS: dynamic influence, finite element method, dynamic interaction "structure – soil", wave propagation in unbounded area, unbounded area, scaled boundary finite-element method, LIRA-SAPR program.

Розрахунок необмеженої області методом скінченних елементів на динамічні впливи не розв'язує суттєву проблему - відбиття хвилі. Для застосування методу скінченних елементів в обмеженій області необхідно врахувати згасання хвилі, яка відбивається від границь. Відбиття від границь, на яких є в'язі на переміщення, можна зменшити за рахунок набору елементів у вигляді «пружина – демпфер». Проте такими прийомами повністю прибрати відбиття хвилі неможливо, і це призводить до того, що розрахунок стає умовно придатним [1].

Існує два загальних підходи у моделюванні системи "ґрунт-споруда" - прямий метод та метод підсистем.

У першому (прямому) підході обмежена частина необмеженого ґрунту моделюється разом із структурою, найчастіше скінченними елементами (рис. 1). При прямому методі хвилі відбиваються

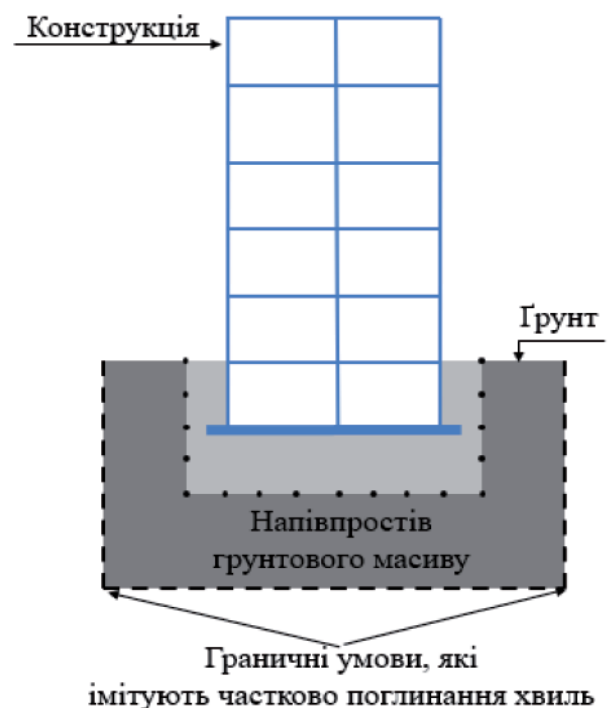


Рисунок 1 – Прямий метод



від штучно наведених рубежів, змушуючи енергію повертатися у систему. Щоб зменшити негативний вплив цього явища, необхідно збільшити область, яку займає ґрунтова основа, віддалити границю від споруди таким чином, щоб час досягнення хвилею границі був менше, ніж час дії навантаження, тому що значно збільшується час розрахунків. Але цей прийом є неефективним, особливо для тривимірних задач.

У другому підході обмежені та необмежені частини моделюються як дві підструктури, розділені узагальненою лінією взаємодії. Обмежена підструктура складається із будівлі та частини суміжного з будівлею ґрунту з додатковими граничними умовами. Ця частина може мати нелінійності і щодо моделі споруди, і щодо моделі ґрунту. Необмежена підсистема складається з решти частини ґрунту, що тягнеться до нескінченності (рис. 2).

Поєднання двох підсистем відбувається за допомогою вектору взаємодії $r_b(t)$, що діє у обидва напрями, на будівлю та на масив ґрунту. Вектор взаємодії у прямій динамічній задачі представлено у вигляді вектора згортки:

$$r_b(t) = \int_0^t M_b^\infty(t) \ddot{u}(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

де $M_b^\infty(t)$ - матриця відгуку прискорення. Індекс b позначає вузли, що лежать на лінії взаємодії, які належать як структурі, так і ґрунту. Рівняння руху у задачі часу можна записати як:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \dot{u}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_b(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_s(t) \\ p_b(t) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ r_b(t) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

де матриці K , C і M - матриці жорсткості, демпфування та маси структури відповідно, $u(t)$, $\dot{u}(t)$ та $\ddot{u}(t)$ - вектори переміщень, швидкостей та прискорень, $p(t)$ - вектор сил, які діють безпосередньо на структуру. Індекс s позначає вузли, які належать лише структурі. Для розв'язання цього рівняння потрібно знати вектор сил взаємодії ґрунту та структури $r_b(t)$. Іншими словами, потрібно визначити матрицю відгуку прискорення $M_b^\infty(t)$.

Рівняння SBFEM у часі має вигляд

$$\begin{aligned} & \int_0^t [m^\infty(t - \tau)] [m^\infty(\tau)] d\tau + t \int_0^t [m^\infty(t - \tau)] d\tau + \\ & + [e^1] \int_0^t \int_0^\tau [m^\infty(\tau)] d\tau dt + [e^1]^T \int_0^t \int_0^\tau [m^\infty(\tau)] d\tau dt - \\ & - \frac{t^3}{6} [e^2] H(t) - t [m^0] H(t) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

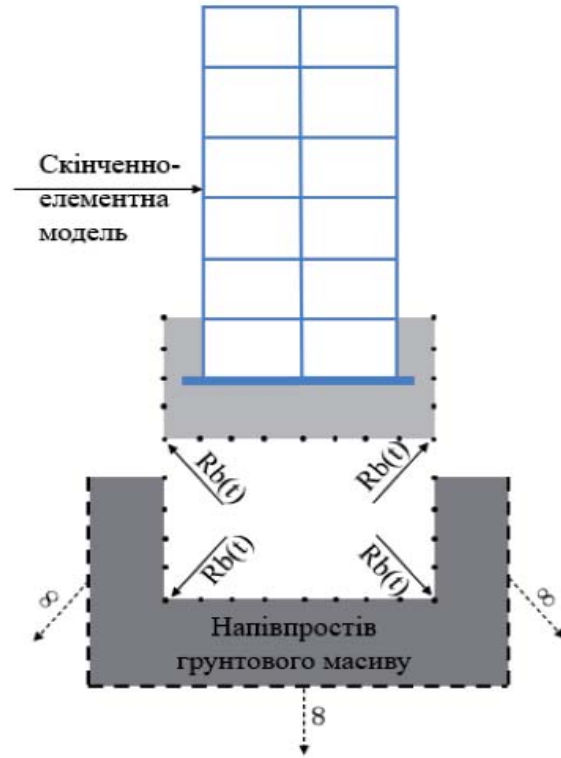


Рисунок 2 – Метод підсистем

де $H(t)$ – функція Хевісайда та

$$[m^\infty(t)] = ([U]^{-1})^T [M^\infty(t)] ([U]^{-1}) \quad (4)$$

Верхньотрикутна матриця $[U]$ визначається з розкладення матриці коефіцієнтів $[E^0]$ як

$$[E^0] = [U]^T [U] \quad (5)$$

$$[e^1] = ([U]^{-1})^T [E^1] [U]^{-1} - \frac{s+1}{2} [I] \quad (6)$$

$$[e^2] = ([U]^{-1})^T ([E^2] - [E^1][E^0]^{-1}[E^1]^T) [U]^{-1} \quad (7)$$

$$[m^0] = ([U]^{-1})^T [M^0] [U]^{-1} \quad (8)$$

Для розв'язання рівняння використовується метод дискретизації.

Матриця відгуку прискорення $M^\infty(t)$ визначається як

$$[M^\infty(t)] = [U]^T [m^0] [U] \quad (9)$$



За наведеними матричними залежностями та рівняннями (1-9) створено чисельну процедуру формування рівнянь руху та, як окремий випадок, рівнянь рівноваги, у задачах, де є необмежені області. Цю процедуру впроваджено в програмний комплекс "ЛІРА-САПР".

У Державних будівельних нормах В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах» (таблиця 6.2, ДБН В.1.1-12 діє до: 2014 [2]) передбачено, що для «будівель і споруд з принципово новими конструктивними рішеннями, які не пройшли експериментальної перевірки, об'єктів класу наслідків СС2 і СС3 згідно ДБН В.1.2-14; будівель вище 16 поверхів і споруд заввишки 50 м і більше, а також споруд з прольотами понад 30 м ... » необхідний прямий динамічний розрахунок із застосуванням розрахункових акселерограм.

Розглянемо деякі питання моделювання системи «надземна споруда- ґрунтова основа» на сейсмічні впливи на прикладі будівлі, що розташована на будівельному майданчику в межах вулиць Маршрутна, Сибірська, Героїв Крут (Терешкової), Комарова у м. Одесі (далі скорочено - майданчик).

Встановлено, що на цьому майданчику з ймовірністю один раз у 500 років може статися землетрус з інтенсивністю 7 балів за шкалою MSK – 64. Залежно від положення сейсмічної зони щодо майданчика, його сейсмічного режиму, величини енергії, яка звільняється в осередку вогнища землетрусу, механізму землетрусу, а також від спектральних особливостей впли-

ву середовища на шляху поширення сейсмічних хвиль від вогнища до майданчика змінюється величина пікових прискорень, тривалість коливань, форма обвідної і спектральний склад розрахункової акселерограми.

На рис. 3 представлені розрахункові акселерограми. Вони являють собою часові функції, які моделюють компоненти вектора прискорень у сейсмічних рухах поверхні ґрунту на майданчику.

Землетрус на майданчику можуть викликати як сильний підкорковий землетрус з сейсмоактивної зони Вранча (Румунія), так і вогнища землетрусів відповідної розсіяної (доменної) сейсмічності у районі м. Одеси [2-5]. За відсутності для міста Одеси та Одеської області результатів робіт з виявлення та засвідчення сучасної активності розломних зон, при визначенні сейсмічних впливів від місцевих землетрусів доводиться приймати консервативне припущення, згідно з яким вогнище слабо місцевого землетрусу може перебувати у жорстких слабо деформованих породах безпосередньо під будівельним майданчиком.

Розрахункові акселерограми, що моделюють землетрус у зоні Вранча, на будівельному майданчику синтезувалися за допомогою регуляризованого алгоритму зворотного перетворення Фур'є [6]. На рис. 3 наведено приклад графіка трикомпонентної розрахункової акселерограми, що моделює землетрус із зони Вранча з інтенсивністю 7 балів для вільної поверхні ґрунту будівельного майданчика у межах вулиць: Маршрутна, Сибірська, Героїв Крут (Терешкової),

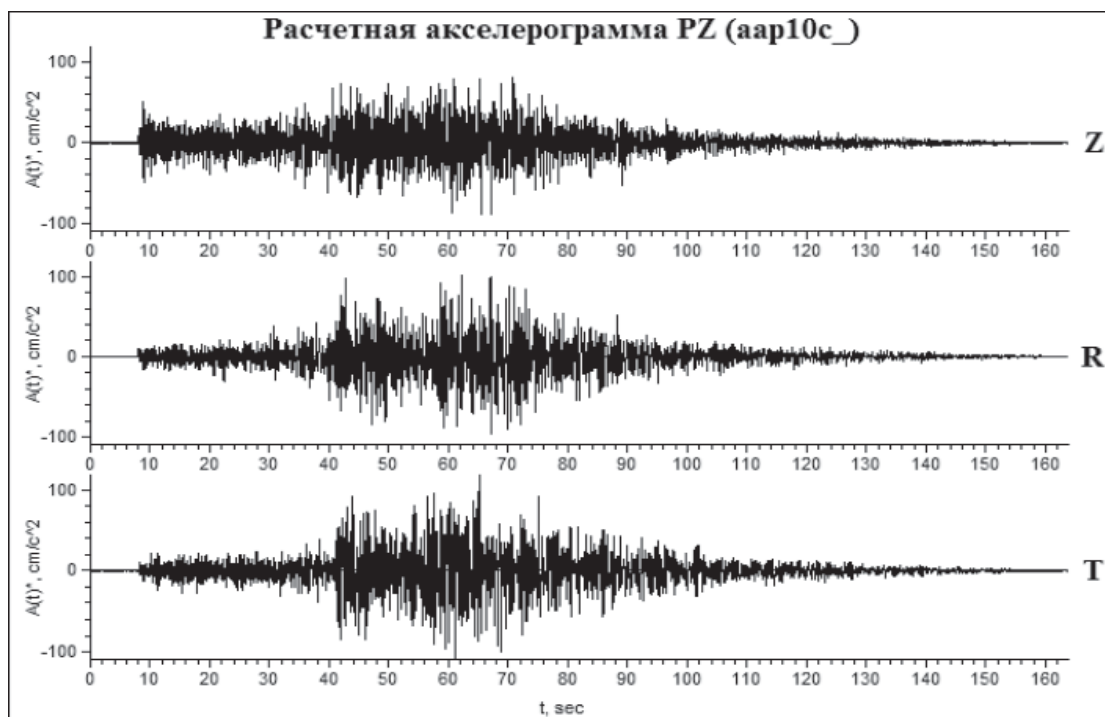


Рисунок 3 – Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми, що моделює 7-ми бальний розрахунковий землетрус із зони Вранча для вільної поверхні ґрунту будівельного майданчика у межах вулиць: Маршрутна, Сибірська, Героїв Крут (Терешкової), Комарова в м. Одеса

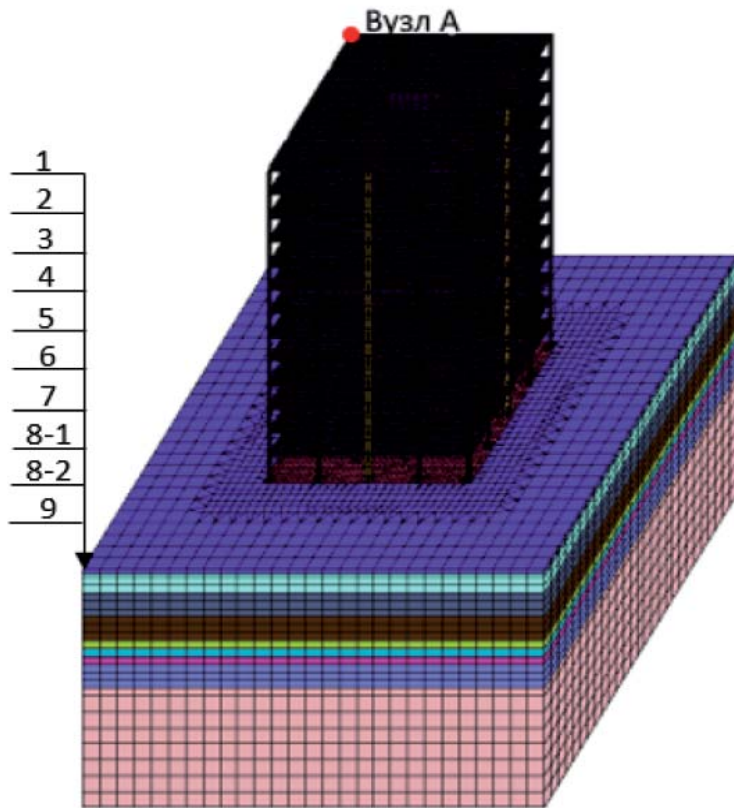


Рисунок 4 – Загальний вигляд розрахункової схеми: 1 - насипний шар (перевал суглинку, биті цегли, щебню); 2 - суглинок лесовий; 3 - супісок лесовий; 4 - суглинок лесовий (від напівтвердого до тугопластичного); 5 - суглинок лесовий (м'якопластичний); 6 - суглинок лесовий (напівтвердий); 7 – глина; 8-1 – супісок; 8-2 – суглинок; 9 - пісок жовтий

Комарова в м. Одеса.

Чисельний експеримент проводився у ПК ЛІРА-САПР (рис. 4). Розрахунок будівлі виконано з урахуванням вітрових і снігових навантажень згідно району будівництва. Враховано довготривалі і короткочасні навантаження на плити перекриття типових поверхів, а також фізико-механічні характеристики ґрунтової основи.

Для цього чисельного експерименту були визначена наступна задача: аналіз поведінки і реакції конструкцій будівлі на сейсмічні впливи з урахуванням відстані від епіцентру, просторової роботи конструкції, взаємодії з ґрунтовою основою і ін.

На підставі вихідних даних, наведених у роботі [7], було розроблено тривимірну комп'ютерну модель 13-поверхової будівлі в середовищі ПК ЛІРА-САПР. Товщина монолітного перекриття 200 мм, товщина вертикальних несучих конструкцій 200 та 300 мм. Фундамент - суцільна монолітна залізобетонна плита

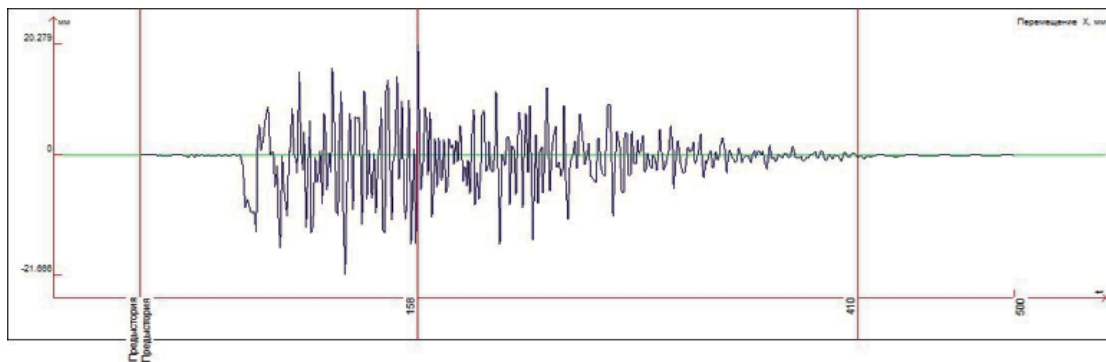


Рисунок 5 – Переміщення у часі вузла № 126511 вздовж осі X (за методом підсистем)

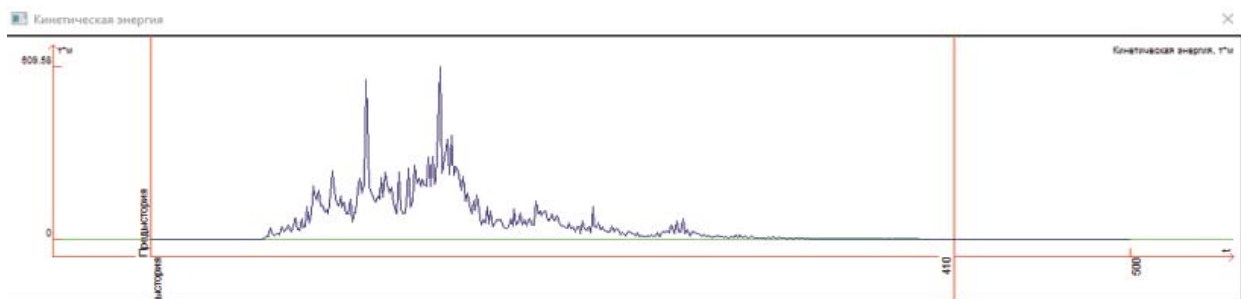


Рисунок 6 – Переміщення у часі вузла № 126511 вздовж осі X (за методом підсистем)



товщиною 1200мм на пальному полі розмірами 350x350 мм. Клас бетону С20/25. У моделі споруди використані фізично та геометрично лінійні стрижневі та плоскі скінченні елементи (СЕ 10, СЕ 42, та СЕ 44). Для моделювання основи будівлі використані об'ємні скінченні елементи (СЕ 32, СЕ 34, та СЕ 36). Загальний вигляд розрахункової моделі показано на рис.4. Розрахунок зроблено з використанням отриманих трикомпонентних розрахункових акселерограми (рис. 3) методом спектрального аналізу і виконано прямий динамічний аналіз [8].

Розглянемо результати розрахунків за запропонованою методикою. Для цього додано до схеми розроблені 3-х та 4-х вузлові скінченні елементи (СЕ 67, СЕ 68) на границі ґрунтового масиву. Переміщення (рис. 5) співпадають з характером прикладеної акселерограми (рис. 3). Крім того, кінетична енергія системи після завершення дії динамічного навантаження згасає (рис. 6), що є природним.

Результати чисельного експерименту свідчать про те, що застосування розроблених СЕ дає можливість створювати моделі, які відтворюють реальні умови роботи конструкцій будівлі за динамічних впливів.

Запропонована методика дозволяє розв'язувати фізично нелінійні задачі з ґрунтовим масивом без необхідності значно збільшувати розмірність, а відповідно і час розрахунку.

У сукупності з методикою сейсмічного мікрорайонування запропонована методика дає можливість створювати коректні моделі будівель і споруд за сейсмічних впливів і оцінювати їх сейсмостійкість.

Ця методика рекомендується для використання при проектуванні, тому що при її використанні враховуються всі вищезазначені фактори.

ВИСНОВКИ

Нова методика розв'язання задач прямим динамічним методом системи «споруда-фундамент-основа» з урахуванням фізичної нелінійності, що розглянута в статті, дозволяє враховувати безперервне проходження хвилі у нескінченну область, що моделює картину проходження хвиль, наближену до реальності. Робота ґрунтового напівпростору моделюється ділянкою ґрунтового масиву з обмеженим розміром.

Завдяки застосуванню методики створення моделі з граничними умовами у вигляді «прозорих» граничних елементів можливо обмежити розмір ґрунта, і за рахунок цього скоротити час розрахунку моделі та підвищити точність розрахунку.

Запропонована методика дозволяє більш

точно моделювати поведінку конструктивної системи будівлі або споруди, дає можливість моделювати згасання коливальних, усуває недоліки спектрального та прямого динамічного аналізу

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Городецкий А. С. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие. А. С. Городецкий, А. В. Пикуль, Б.Ю. Писаревский. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Том. 13. № 3. С.34-41.
2. Будівництво в сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2014. [Чинний від 01-10-2014]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с. (Державні будівельні норми України).
3. Корчинский И.Л., Поляков С.В., Быховский В.А., Дюзинкевич С.Ю., Павлык В.С. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. Госстройиздат, М., 1961.
4. Дукарт А.В., Олейник А.И. О применении многомассовых динамических гасителей колебаний для виброзащиты высотных зданий башенного типа при сейсмических воздействиях. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. № 11. С. 4-10.
5. Барабаш М.С. Напряжено-деформированный стан конструкцій з урахуванням категорії технічного стану будівлі та зміни інтенсивності сейсмічного навантаження. М.С. Барабаш, Н.О. Костира, Я.В. Башинський, Б.Ю. Писаревський. *Проблеми розвитку міського середовища: зб. наук. праць*. Вид. офіц. Київ: НАУ, 2020. № 1 (24). С. 11-22.
6. Дукарт А.В., Олейник А.И. Способ моделирования искусственных акселерограмм землетрясений с помощью поличастотного линейного фильтра. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 10. С. 95-104.
7. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений: Пер. с англ. Москва: Стройиздат, 1979. 320 с.
8. Varabash M. (2021). Modelling of the Subway Dynamic Influence on the Ground Structure. M. Varabash, Bogdan Y. Pysarevskiy. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. № 17, Issue 3, 14-25.



REFERENCES

1. Horodetskyi A.S. (2017). Modelling the soil behaviour in dynamic load. Horodetskyi A.S., Pikul A.V., Pisarevskyi B.Yu. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Vol. 13, Issue 3, 34-41.
2. Construction in seismic areas of Ukraine: DBN B.1.1-12: 2014. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. (Building codes of Ukraine). (2014).
3. Korchinskyi I.L., Polyakov S.V., Bykhovskyi V.A., Dyuzinkevich S.Yu., Pavlyk V.S.. (1961). Fundamentals for Design of Buildings in Seismic Areas. Moscow: Gosstroyizdat.
4. Dukart A.V., Oleinik A.I. (2003). Multi-mass dynamic vibration dampers used for vibration protection of tower-type high-rise buildings under earthquake load. Proceedings of higher educational institutions. Construction, 11, 4-10.
5. Barabash M.S. (2020). Stress-strain state of structures with account of the category for technical condition of the building and changes in the intensity of earthquake load. Barabash M.S., Kostira N.O., Bashinsky Ya.V., Pisarevsky B.Yu. Problems in development of urban environment: collection of articles. Issue 1 (24), 11-22. Kyiv: NAU.
6. Dukart A.V., Oleinik A.I. (2009). Simulation of non-natural earthquake accelerograms with a multi-frequency linear filter. Proceedings of higher educational institutions. Construction, 10, 95-104.
7. Ray W. Clough, Joseph Penzien. (1979). Dynamics of Structures. Moscow: Stroyizdat.
8. Barabash M. (2021). Modelling of the Subway Dynamic Influence on the Ground Structure. M. Barabash, Bogdan Y. Pysarevskiy International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 17, Issue 3, 14-25.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2021 року