

УДК 624.15 : 624.131.2

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМ ЗАСНОВАНИХ НА МЕТОДІ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ (МСЕ) ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ «ОСНОВА - ІНЖЕНЕРНА СПОРУДА»

САВЕНКО В.О.^{1*}, *асп.*
ТИМЧЕНКО Р.О.^{2*}, *д.т.н., проф.*,
КРИШКО Д.А.^{3*}, *к.т.н., ст. вик.*,

^{1*} Кафедра промислового, цивільного та міського будівництва, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет", вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Дніпропетровська область, Україна, тел. +38 (097) 730-56-30, e-mail: sav_vov1@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0679-890950027

^{2*} Кафедра промислового, цивільного та міського будівництва, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет", вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Дніпропетровська область, Україна, тел. +38 (0564) 71-95-98, e-mail: radomirtimchenko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

^{3*} Кафедра промислового, цивільного та міського будівництва, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет", вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Кривий Ріг, Дніпропетровська область, Україна, тел. +38 (0564) 71-95-98, e-mail: dak_sf@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5853-8581

Анотація. Мета. У практиці проектування і експлуатації необхідно оцінювати можливість деформування споруд, розташованих на основах, на яких можливі нерівномірні осідання і просідання. Тільки при достовірному і докладному визначенні напружено-деформованого стану конструкцій споруд спільно з ґрунтовими масивами при моделюванні можна обґрунтовано застосовувати МСЕ на практиці. **Методика.** Сучасний рівень комп'ютерів і програмного забезпечення дозволяє виконувати уточнені розрахунки напруженого стану досить складних систем. За деякими програмами можливо рішення не тільки лінійних, а й нелінійних задач. При цьому передбачено врахування особливостей деформування різних матеріалів: залізобетону, сталі, ґрунту і т.п. Для обліку роботи ґрунту розроблено кілька моделей, що враховують перехід ґрунту в пластичний стан, в'язкопружне деформування і інші моделі. Необхідно зіставлення адекватних моделей і їх апробація для вирішення практичних завдань. В даний час найбільш широко застосовуються кілька великих програм, розроблених в США, Західній Європі, Україні і Росії. В Україні широко поширені програми Ліра-Windows, Мономах, SCAD - Office, які орієнтовані в основному на розрахунки об'єктів будівництва. У всьому світі великий обсяг завдань вирішується за програмами ANSYS, PLAXIS, SolidWorks, LS-DYNA, Midas GTS NX і ін. **Результати.** Виконані розрахунки за допомогою програми PLAXIS дозволили провести аналіз напружено-деформованого стану ґрунтового масиву і стійкості підпірних стін: I варіант - прототип, кутникова підпірна стінка; II варіант - підпірна стінка спеціального типу. При однаковій ґрунтовій основі (геометрія шарів і фізико-механічні властивості), навантаження і граничні умови, очевидним є наявність для II варіанту включення в роботу всього масиву ґрунту і рівномірний перерозподіл напружень по лицьовій і фундаментній плитам (за загальними напруженнями); рівномірність загальних деформацій конструкцій і ґрунтової основи, яка, в свою чергу, забезпечує більшу стійкість підпірної стінки (по загальній картині переміщень). **Наукова новизна та практична значимість.** Обґрунтованість теоретичного прогнозу поведінки інженерних споруд, що взаємодіють з нерівномірно-деформованими основами, не може бути отримана на основі нормативної бази. Цю прогалину може бути заповнено при моделюванні системи "основа - інженерна споруда" за допомогою сучасних розрахункових програм МСЕ.

Ключові слова: контактні напруження, території, що підроблюються, підпірна стінка спеціального типу, PLAXIS

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ) ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ - ИНЖЕНЕРНОЕ СООРУЖЕНИЕ»

САВЕНКО В.О.^{1*}, *асп.*
ТИМЧЕНКО Р.О.^{2*}, *д.т.н., проф.*,
КРИШКО Д.А.^{3*}, *к.т.н., ст. преп.*,

^{1*} Кафедра промышленного, гражданского и городского строительства, Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет", ул. Виталия Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Днепропетровская область, Украина, тел. +38 (0564) 71-95-98, e-mail: sav_vov1@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0679-8909

^{2*} Кафедра промышленного, гражданского и городского строительства, Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет", ул. Виталия Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Днепропетровская область, Украина, тел. +38 (0564) 71-95-98, e-mail: radomirtimchenko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

^{3*} Кафедра промышленного, гражданского и городского строительства, Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет", ул. Виталия Матусевича, 11, 50027, Кривой Рог, Днепропетровская область, Украина, тел. +38 (0564) 71-95-98, e-mail: dak_sf@mail.ru, ORCID ID:0000-0001-5853-8581

Аннотация. Цель. В практике проектирования и эксплуатации необходимо оценивать возможность деформирования сооружений, расположенных на основаниях, в которых возможны неравномерные осадки и просадки. Только при достоверном и подробном определении напряженно-деформированного состояния конструкций сооружений совместно с грунтовыми массивами при моделировании можно обоснованно применять МСЭ на практике. **Методика.** Современный уровень компьютеров и программного обеспечения позволяет выполнять уточненные расчеты напряженного состояния достаточно сложных систем. По некоторым программам возможно решение не только линейных, но и нелинейных задач. При этом предусмотрен учет особенностей деформирования различных материалов: железобетона, стали, почвы и т.п. Для учета работы почвы разработано несколько моделей, учитывающих переход почвы в пластическое состояние, вязкоупругих деформирования и другие модели. Необходимо сопоставление адекватных моделей и их апробация для решения практических задач. В настоящее время наиболее широко применяются несколько крупных программ, разработанных в США, Западной Европе, Украине и России. В Украине широко распространены программы Лира-Windows, Мономах, SCAD - Office, которые ориентированы в основном на расчеты объектов строительства. Во всем мире большой объем задач решается с программами ANSYS, PLAXIS, SolidWorks, LS-DYNA, Midas GTS NX и др. **Результаты.** Выполнены расчеты с помощью программы PLAXIS позволили провести анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива и устойчивости подпорных стен: I вариант - прототип, уголкового подпорная стенка; II вариант - подпорная стенка специального типа. При одинаковой грунтовой основе (геометрии слоев и физико-механические свойства), нагрузках и граничных условиях нагрузки очевидно наличие для II варианта включения в работу крупного массива грунта и равномерное перераспределение напряжений по лицевой и фундаментной плиты (по общим напряжением) равномерность общих деформаций конструкций и грунтового основания, которая, в свою очередь, обеспечивает большую устойчивость подпорной стенки (по общей картине перемещений). **Научная новизна и практическая значимость.** Обоснованность теоретического прогноза поведения инженерных сооружений, взаимодействующих с неравномерно-деформированными основаниями, не может быть получена на основе нормативной базы. Этот пробел может быть восполнен при моделировании системы "основание - инженерное сооружение" с помощью современных расчетных программ МСЭ.

Ключевые слова: контактные напряжения, подрабатываемые территории, подпорная стена специального типа, PLAXIS

THE APPLICATION PROGRAMS OF FINITE ELEMENT METHODS (FEM) SIMULATION SYSTEM OPERATION OF «BASE - ENGINEERING CONSTRUCTIONS»

SAVENKO V.O. ^{1*}, *PhD student.*

TIMCHENKO R. A. ^{2*}, *Dr.Sc.(Tech), Prof.,*

KRISHKO D. A. ^{3*}, *Cand.Sc., senior lect.,*

^{1*} Department of industrial, civil and urban building, State higher educational institution "Kryvyi Rih National University", str. XXII Vitaliy Matusevicha, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (096) 326-76-81, e-mail: sav_vov1@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0679-8909

^{2*} Department of industrial, civil and urban building, State higher educational institution "Kryvyi Rih National University", str. Vitaliy Matusevicha, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (0564) 71-95-98, e-mail: radomirtimchenko@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0684-7013

^{3*} Department of industrial, civil and urban building, State higher educational institution "Kryvyi Rih National University", str. Vitaliy Matusevicha, 11, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38 (0564) 71-95-98, e-mail: dak_sf@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5853-8581

Abstract. Purpose. In practice, the design and operation is necessary to assess the possibility of deformation structures located on the grounds, which are possible uneven rainfall and subsidence. Only with reliable and detailed definition of the stress-strain state of structures designs in conjunction with the soil mass in the simulation can be reasonably applied to the FEM practice. **Methodology.** The present level of computer hardware and software allows you to perform more accurate calculations of the stress state of fairly complex systems. For some programs possible solution not only linear but also nonlinear problems. This provides accounting features of deformation of different materials: concrete, steel, soil, etc. To take into account the work of the soil developed several models that take into account the transition of soil in a plastic state, the elastic deformation and other models. A comparison should be of adequate models and testing them to solve practical problems. Currently, the most widely used several large programs, developed in the United States, Western Europe, Ukraine and Russia. In Ukraine, widespread program of Lira-Windows, Monomakh, SCAD - Office, which focused mainly on estimates of construction projects. In the world a large amount of problems solved with the programs ANSYS, PLAXIS, SolidWorks, LS-DYNA, Midas GTS NX and others. **Originality.** Calculations using PLAXIS program allowed an analysis of the stress-strain state of the soil mass and stability of retaining walls: I option - the prototype, angular retaining wall; II option - retaining wall of a special type. At the same ground-based (the geometry of the layers and the physical and mechanical properties), loads and boundary conditions, load obvious presence of the II option included in the work of the whole array of ground and uniform redistribution of stresses on the front and the base plate (for common voltage) is

uniformly total deformation structures and ground a base, which in turn provides greater stability of the retaining wall (motion picture on the total). **Practical value.** The validity of the theoretical prediction of behavior of engineering structures, interacting with non-uniformly deformed-basics can not be obtained on the basis of the regulatory framework. This gap can be filled in the simulation system "foundation - engineering facility" with the help of modern calculation FEM programs.

Key words: contact tensions, undermined territories, retaining wall of a special type, PLAXIS

Вступ

Будівництво на основі, що деформується має дуже широке поширення. В останні роки в міру вичерпання територій, найбільш сприятливих для забудови, все більш широкий масштаб набуває будівництво на територіях зі складними умовами (підроблені території, основи що просідають, карстові території та території, що підтоплюються і т. д.), які характеризуються значною нерівномірною деформованістю ґрунтів [3, 7].

Інженерні методи розрахунку, що традиційно застосовуються в проектуванні, не можуть відповісти на всі питання практики експлуатації. В останні десятиліття у багатьох країнах набули широкого поширення програми, засновані на методі скінченних елементів (МСЕ) [6, 9]. Ці програми мають досить широку сферу застосування і по ним можливе визначення напружено-деформованого стану, в тому числі конструкцій, і в системі "основа - інженерна споруда".

Мета

У практиці проектування і експлуатації необхідно оцінювати можливість деформування споруд, розташованих на основах, в яких можливі нерівномірні осідання і просідання. Тільки при достовірному і докладному визначенні напружено-деформованого стану конструкцій споруд спільно з ґрунтовими масивами при моделюванні можна обґрунтовано застосовувати МСЕ на практиці.

Методика

Сучасний рівень комп'ютерів і програмного забезпечення дозволяє виконувати уточнені розрахунки напруженого стану досить складних систем. Як правило, застосування сучасних програм, орієнтованих на розрахунок систем з великою кількістю (в сотнях тисяч невідомих), більш ефективно, ніж розрахунки за традиційними схемами.

За деякими програмами можливо рішення не тільки лінійних, а й нелінійних задач. При цьому передбачено врахування особливостей деформування різних матеріалів: залізобетону, сталі, ґрунту і т.п. Для обліку роботи ґрунту розроблено кілька моделей, що враховують перехід ґрунту в пластичний стан, в'язкопружне деформування і інші моделі. Для кожних ґрунтових умов і виду напруженого стану доцільний підбір певних моделей деформування. Необхідно зіставлення адекватних моделей і їх апробація для вирішення практичних завдань.

В даний час найбільш широко застосовуються кілька великих програм, розроблених в США, Західній Європі, Україні і Росії. Причому є тенденції поєднувати в одній програмі вирішення багатьох завдань з різних областей знань.

В Україні широко поширені програми Ліра-Windows, Мономах, SCAD - Office, які орієнтовані в основному на розрахунки об'єктів будівництва. У всьому світі великий обсяг завдань вирішується за програмами ANSYS, PLAXIS, SolidWorks, LS-DYNA, Midas GTS NX та ін.

ANSYS – універсальна програмна система кінцево-елементного (МСЕ) аналізу, існуюча і розвивається на протязі останніх 30 років, є досить популярною у фахівців в сфері автоматизованих інженерних розрахунків (CAE, Computer-Aided Engineering) і РЕ рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла і механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), завдань механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів [2].

LS-DYNA – багатоцільова програма, яка використовує явне формулювання методу скінченних елементів (МСЕ), – призначена для аналізу нелінійного динамічного відгуку тривимірних пружних структур [11, 10].

SolidWorks – ядро інтегрованого комплексу САПР. Завдання, які вирішуються: гібридне параметричне моделювання, проектування деталей, зборок і виробів з урахуванням специфіки виготовлення (листовий матеріал, прес-форми і штампи, зварні конструкції), експрес-аналіз (масово-інерційні характеристики, аналіз міцності і кінематики), оформлення креслень по ЕСКД [1, 5].

Midas GTS NX – є повністю інтегрованою системою у вигляді єдиного кінцево-елементного програмного комплексу, призначеного для виконання комплексних геотехнічних розрахунків, і який охоплює весь спектр інженерно-геотехнічних проектів, включаючи розрахунки глибоких котлованів з різними варіантами кріплення, тунелів складної форми, розрахунки консолідації і фільтрації, а також розрахунки на динамічні дії і розрахунки стійкості.

Певний інтерес представляє програма PLAXIS для моделювання контактної взаємодії елементів системи "основа – інженерна споруда" [13, 12].

Програма PLAXIS – це пакет кінцевих елементів, розроблений спеціально для аналізу деформації та стійкості геотехнічних споруд. Проста процедура графічного введення дозволяє швидко скласти

комплексні моделі кінцевих елементів, а вихідним пристроїв здійснювати детальне уявлення результатів розрахунку. Сам розрахунок повністю автоматизований і заснований на стійких чисельних методах.

Найбільш поширеними інженерними спорудами в містобудівному проектуванні на сьогодні є підпірні стінки, які використовуються для огорожі:

- укосів насипів і виїмок всередині майданчикових і під'їзних залізничних колій та автомобільних доріг при неможливості виконання укосів з необхідними ухилами;

- котлованів в процесі будівництва при неможливості виконання укосів з необхідними ухилами;

- спеціальних споруд - рамп, складів сипучих матеріалів, бункерних естокади і рудних дворів металургійних заводів;

- окремих завищених або занижених за умов технології ділянок, розташованих в межах і за межами будівель.

З давніх часів використовувалися масивні підпірні стінки з кам'яних блоків і плит для підтримки укосів, виїмок, насипів та природних схилів. Але технічний прогрес і закони економічної ефективності звертають увагу на конструктивні особливості підпірної стінки та властивості взаємодії з нею ґрунту. Відповідно до мети роботи основними питаннями є оптимізація конструкції підпірних стінок з урахуванням наступних характеристик:

- максимальне включення до роботи ґрунту підсипки;

- зменшення значень активного тиску ґрунту;

- збільшення опору зсуву по підшві підпірної стінки;

- мінімізація витрат матеріалу.

Важливим фактором, що дозволяє вирішувати поставлені завдання, є високий ступінь вивченості інженерно-геологічних умов у великих промислових містах і обласних центрах. Сучасні дослідження спрямовані на уточнення в основному геотехнічного характеру.

Досвід останніх років показує, що розвиток небезпечних процесів на урбанізованих територіях триває. В першу чергу, це процеси підтоплення територій, розвиток деформацій зрушень, просідання поверхні над гірничими виробками, просідання лесових ґрунтів і т.п. З цими процесами пов'язано зниження експлуатаційної придатності або деформації, руйнування будівель та споруд [8].

На територіях, що підроблюються і ґрунтах, що просідають при складних деформаціях основи не завжди можливо використовувати відомі технічні рішення, так як вони не придатні до цих умов роботи. Існуючі конструкції підпірних стін не розраховані на додаткові зусилля від горизонтального зсуву або вертикального переміщення ґрунту, який викликає їх концентрацію в нижній частині лицьового плити і, звичайно, призведе до руйнування конструкції.

Тому виникла необхідність у використанні нових конструкцій, які б враховували перелічені недоліки і підвищили надійність експлуатації непридатних територій.

Підпірна стінка спеціального типу (рис. 1) для захисту територій від руйнування являє собою вдосконалену конструкцію підпірної стінки кутникового типу з порожнинами на вертикальному і фундаментному елементах з боку ґрунту (так звані контактні поверхні).

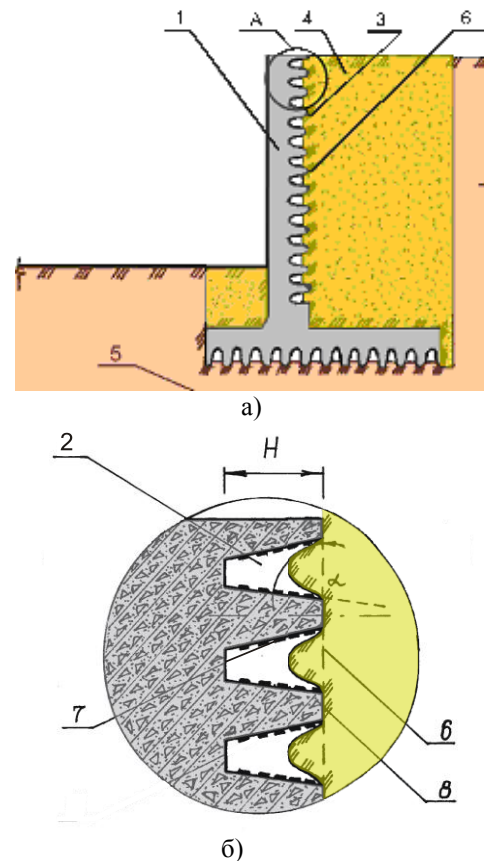


Рис. 1. Підпірна стінка кутникового типу з порожнинами: а) загальний вигляд; б) вузол А
1 – вертикальний елемент; 2 – порожнини; 3 – опорні частини; 4 – ґрунт засипки; 5 – ґрунт основи; 6 – площина основи; 7 – грані; 8 – ребра /

Retaining wall of angular type with voids: а) general view; б) node A

1 – vertical element; 2 – cavity; 3 – supporting parts; 4 – backfill soil; 5 – soil base; 6 – plane basis; 7 – faces; 8 – ribs

Запропонована підпірна стінка складається з вертикального елемента 1, який має порожнини 2 і опорні частини 3 в напрямку дії зсувного ґрунту, і фундаментного елемента, який також має порожнини 2 і опорні частини 3, в напрямку дії ґрунту, який вертикально переміщується.

ґрунт засипки 4 і ґрунт основи 5, який переміщується в порожнині 2, що має форму усічених пірамід, з основою 6 і бічними гранями 7. Бічні грані 7 і порожнини 2 складають фактичні бічні поверхні опорних частин 3. Грані 7 утворюють ребра

8 в площині основи 6, які складають поверхню, що огинає опорні частини.

Така конструкція обумовлює зниження піків контактних напружень на поверхні за рахунок рівномірного перерозподілу тиску в переміщуваному ґрунті. У цьому випадку використовується явище "арочного ефекту", що дозволяє рівномірно ущільнити ґрунт з однаковим рівнем тиску на всіх контактують з ґрунтом призматичних ділянок підпірної стінки.

З огляду на характер роботи підпірної стінки спеціального типу, необхідно посилення її конструкції по параметру сумарним горизонтальним навантаженням, яке виникає на площині лицьової плити підпірної стінки від зсуву ґрунту, цей параметр впливає на коефіцієнт запасу на контактній площині, яка враховує можливі зміни розрахункових навантажень.

Дана стінка може бути використана для стабілізації нестійких схилів і укосів, а також на територіях, що підроблюються з горизонтальним і вертикальним переміщенням ґрунту. Таке з'єднання фундаментної і лицьової плит може найкращим чином забезпечити надійну роботу даної споруди.

Підпирна стінка відрізняється високою надійністю експлуатації в критичній ситуації непередбаченого аварійного зростання силового навантаження.

Це обумовлено самою роботою конструкції, тобто зі збільшенням навантаження опорні площі призматичних ділянок весь час ростуть, а тому обсяг порожнин рано чи пізно буде повністю заповнений ґрунтом, тоді опорна площа підпірної стінки значно зростає, а середній тиск при цьому зменшиться при досягнутому рівні ущільнення. Однак після цього підпирна стінка не зможе працювати в режимі перерозподілу контактних тисків і буде працювати як звичайна підпирна стінка.

Завдяки запропонованим інженерним конструкціям, які не тільки мають теоретичне обґрунтування, а й відповідний розрахунок з порівняльними характеристиками вдосконалених моделей з прототипами, можливе використання їх на несприятливих територіях в містобудівних цілях.

Результати

Виконані розрахунки за допомогою програми PLAXIS дозволили провести аналіз (рис. 2) напружено-деформованого стану ґрунтового масиву і стійкості підпирних стін:

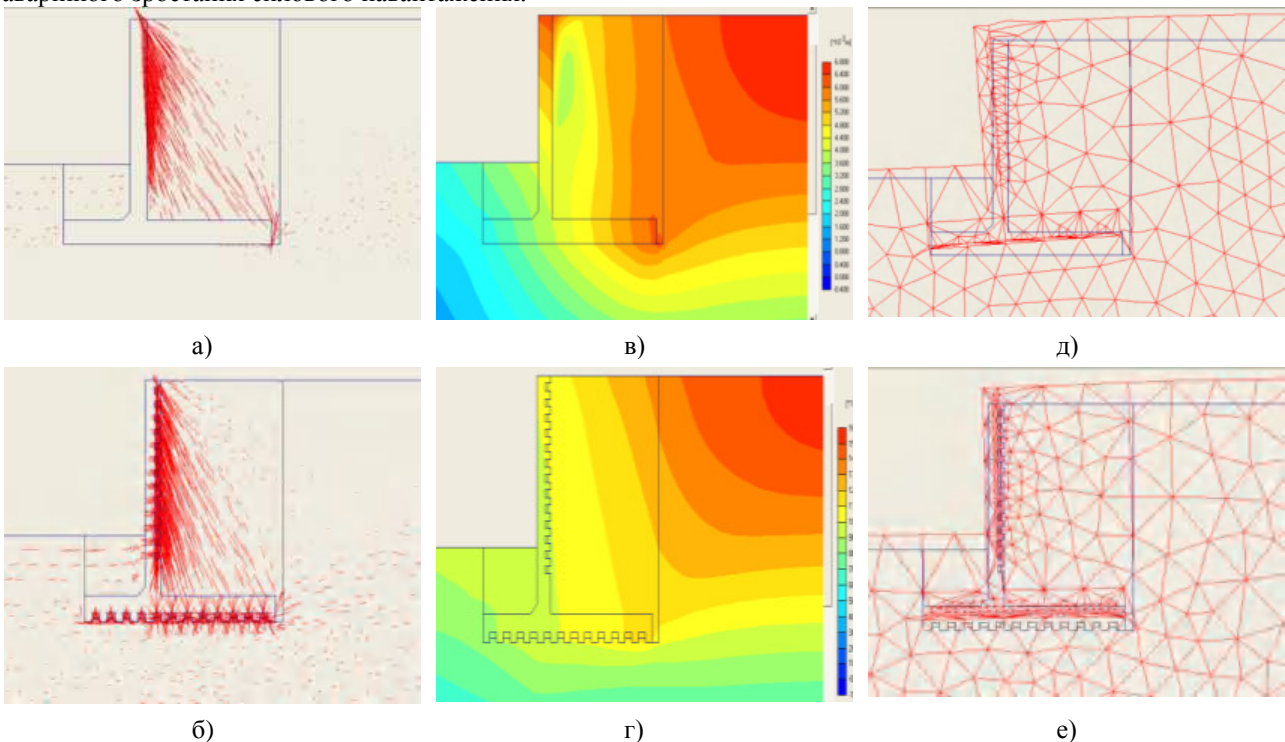


Рис. 2. Порівняння роботи підпирних стін: а – загальні напруження по I варіанту; б – загальні напруження по II варіанту; в – загальні деформації по I варіанту; г – загальні деформації по II варіанту; д – загальна картина переміщень по I варіанту; е – загальна картина переміщень по II варіанту /

Comparison of retaining walls: а – general tension I version; б – general tension II version; в – general strain I version; г – general strain II version; д – the overall picture movement I version; е – the overall picture movement II version

I варіант - прототип, кутникова підпирна стінка;

II варіант - підпирна стінка спеціального типу [4].

При однаковій ґрунтовій основі – (геометрія шарів і фізико-механічні властивості), навантаження

і граничні умови, очевидним є наявність для II варіанту включення в роботу всього масиву ґрунту і рівномірний перерозподіл напружень по лицьовій і фундаментній плитам (за загальними

напруженнями); рівномірність загальних деформацій конструкцій і ґрунтової основи, яка, в свою чергу, забезпечує більшу стійкість підпірної стінки (по загальній картині переміщень).

Висновки

Обґрунтованість теоретичного прогнозу поведінки інженерних споруд, що взаємодіють з нерівномірно-деформованими основами, не може бути отримана на основі нормативної бази. Цю прогалину може бути заповнено при моделюванні системи "основа - інженерна споруда" за допомогою сучасних розрахункових програм МСЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов., А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. / К.А. Басов – Москва: ДМК Пресс, 2009. – 248 с.
3. Кривошеев П.И. Научно-технические проблемы координации действий по защите зданий, сооружений и территорий со сложными инженерно-геологическими условиями / П.И. Кривошеев // Будівництво України. – Київ, 2001. – № 6. – С. 16-19.
4. Пат. 62715 А Україна, МПК 8 Е 02Д 29/02. Підпірна стінка: 62715 А Україна, МПК 8 Е 02Д 29/02 Вілкул Ю.Г., Тімченко Р.О., Кришко Д.А., Дмитрієва К.Ю., Бондар Ю.М (Україна). – № 2003054146; Заявл. 08.05.2003; Опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 4 с.
5. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. / В.П. Прохоренко – Москва: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.
6. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов. Известия Томского политехнического университета. 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 59-65.
7. Тімченко Р.О. Проектування і розрахунок підпірних стін: Навч. посіб. для вищ. навч. заклад. – Кривий Ріг: Вид-во "Мінерал", 2005. – 136 с.
8. Тімченко Р.А. Учет сложного нагружения для плитных фундаментов в условиях неравномерных деформаций оснований // Вісник Академії. – Дніпропетровськ, 2007. – № 7 – С. 24 - 29.
9. Шапиро Д.М. Метод конечных элементов в строительном проектировании: монография. - Воронеж: Научная книга, 2013 (Воронеж : Тип. ООО ИПЦ "Научная книга", 2013). - 181 с.
10. Dr. David J. Benson. The History of LS-DYNA. University Of California. – San Diego, 2009. – 37 p.
11. LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Version 971. – California. – 2007. – 1384 p.
12. Plaxis 2D 2015. Reference manual, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherland, – 424 p.
13. R.B.I. Brinkgreve. P.A. Vermeer. PLAXIS B.V. Version 7. – Rotterdam, Brookfield, 1998. – 70 p.

REFERENCES

1. Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I. and Ponomarev N.B. *SolidWorks. Kompyuternoe modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [Computer modeling in engineering practice]. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2005, 800 p. (in Russian)
2. Basov K.A. *ANSYS dlya konstruktorov* [ANSYS for designers]. Moscow, DMK Press Publ., 2009, 248 p. (in Russian)
3. Krivosheiev P.I. *Naukovo-tekhichni problemy koordinatsiye diy shchodo zakhystu budivel, sporud i terytoriy zi skladnyymi inzhenerno-geolohichnymi umovay* [Scientific and technical problems of coordination for the protection of buildings, structures and areas with complex engineering-geological conditions]. Budivnytstvo Ukrainy [Building of Ukraine]. Kyiv, 2001, no. 6. – pp. 16-19. (in Ukrainian)
4. Vilkul Yu.G., Timchenko R.O., Krishko D.A., Dmitrieva K.Y. and Bondar Y.M. *Pidpirna stinka* [Retaining wall] Patent UA no. u 2003054146; 2003. (in Ukrainian)
5. Prokhorenko V.P. *SolidWorks. Prakticheskoe rukovodstvo* [SolidWorks. Practical guidance]. Moscow, Binom-Press Publ., 2004, 448 p. (in Russian)
6. Strokova L.A. *Opredelenie parametrov dlya chislennogo modelirovaniya povedeniya gruntov* [Determining the parameters for the numerical simulation of the behavior of soils]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008, vol. 313, no. 1. pp. 59-65. (in Russian)
7. Timchenko R.O. *Proektuvannya i rozrakhunok pidpirnykh stin* [Design and calculation of retaining walls]: Navch. posib. dlya vishch. navch. zaklad. – Kriviy Rig, Mineral Publ., 2005, 136 p. (in Ukrainian)
8. Timchenko R.A. *Uchet slozhnogo nagruzheniya dlya plitnykh fundamentov v usloviyakh neravnomernykh deformatsiy osnovaniya* [Accounting for the complex loading of plate bases in non-uniform strain base conditions]. Visnik Akademii, Dnipropetrovsk, 2007, no. 7, pp. 24 - 29. (in Russian)
9. Shapiro D.M. *Metod konechnykh elementov v stroitlnom proektirovanii* [The finite element method in structural design]: monografiya]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2013, 181 p. (in Russian)
10. Benson David J. *The History of LS-DYNA*. University Of California, San Diego. – San Diego, 2009, 37 p.
11. LSTC. *LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1*. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Version 971. – California, 2007, 1384 p.
12. Plaxis 2D 2015. *Reference manual*, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherland, 424 p.
13. R.B.I. Brinkgreve. P.A. Vermeer. *PLAXIS B.V. Version 7*. – Rotterdam, Brookfield, 1998, 70 p.