DOI: https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-4

УДК 699.841+624.042.7

ПЕРЕЛЬМУТЕР А.В.
Доктор техн. наук, головний науковий співробітник, Науково-виробниче товариство «СКАД СОФТ»,
Київ, Україна
e-mail:avp@scadsoft.com
тел.: +38 (050) 382-16-25
ORCID: 0000-0001-9537-2728

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕВІРКИ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ ПРЯМИМ ДИНАМІЧНИМ РОЗРАХУНКОМ

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто питання прямого динамічного розрахунку для задачі оцінювання сейсмостійкості будівель і споруд. Аналіз діючих норм проєктування показує, що цьому питанню приділено менше уваги, ніж іншим методам розрахунку, не зважаючи на те, що прямий динамічний розрахунок спрямований на аналіз найбільш відповідальних споруд. Вказано на існування двох альтернативних підходів до побудови штучних акселерограм. Перший підхід орієнтований на відтворення сейсмічних умов будівельного майданчика, і другий підхід, який спрямований на відтворення найбільш небезпечного сейсмічного навантаження для споруди, що проєктується.

Відносно невеликі зміни динамічних характеристик системи або параметрів акселерограм можуть істотно змінювати реакцію системи на сейсмічну дію і звідси виникає потреба використовувати не одиничну акселерограму, а пакет акселерограм. Аналізуються способи побудови пакета розрахункових акселерограм, при цьому демонструється, що акселерограми з широким спектром, який перекриває весь потрібний діапазон частот, можуть приводити до рішення з сейсмічними навантаженнями меншими, ніж акселерограми з вузьким спектром.

Цей висновок приводить до думки, що пакет треба набирати з акселерограм, що мають вузький спектр, а забезпечення перекриття всього потрібного інтервалу частот реалізувати через пакет загалом. Пропонується заздалегідь створити доступний проєктувальникам комплект 3-х компонентних акселерограм з вузьким спектром, домінантні частоти котрих утворюють ряд, наприклад, 0,5, 1,0, 1,5,..., 5,0 Гц, і комплектувати розрахунковий пакет акселерограм, орієнтуючись на частоти власних коливань системи, або, як альтернативу, вважати розрахунковим пакетом весь цей ряд, не зважаючи на те, що деякі розрахунки будуть зайвими. Розглянуті методики розрахунку у випадку лінійно чи нелінійно деформованих споруд.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сейсмостійкість, прямий динамічний розрахунок, акселерограма, спектр частот.

SOME FEATURES OF SEISMIC RESISTANCE TESTING BY DIRECT DYNAMIC CALCULATION

ABSTRACT

The article addresses the issue of direct dynamic analysis for assessing the seismic resistance of buildings and structures. A review of the current design standards shows that this method receives less attention compared to other calculation methods, despite the fact that direct dynamic analysis is aimed at evaluating the most critical structures. The article highlights the existence of two alternative approaches to the generation of artificial accelerograms. The first approach focuses on reproducing the seismic conditions of the construction site, while the second aims to simulate the seismic loading that would be most hazardous to the structure being designed.

Relatively minor changes in the dynamic characteristics of a system or in the parameters of the accelerograms can significantly affect the system's response to seismic action. This underlines the need to use not a single accelerogram, but a set of accelerograms. The article analyzes methods for constructing a set of design accelerograms and demonstrates that accelerograms with a broad frequency spectrum covering the required range may result in lower seismic loads compared to accelerograms with a narrow frequency spectrum.

This leads to the conclusion that the set should be composed of accelerograms with a narrow spectrum, with the required frequency range being covered by the set as a whole. It is proposed to pre-develop a set of three-component accelerograms with narrow frequency spectra available to designers, in which the dominant frequencies form a series—e.g., 0.5, 1.0, 1.5, …, 5.0 Hz. The design accelerogram set should be compiled with regard to the natural frequencies of the structure, or alternatively, the entire series may be used as the design set, even if some calculations prove unnecessary. The calculation methods are considered for both linearly and nonlinearly deformed structures.

KEYWORDS: seismic resistance, direct dynamic analysis, accelerogram, frequency spectrum.

ВСТУП

Захист споруд від сейсмічної небезпеки є одним з напрямків будівельного проєктування. Проєктування цього захисту і прийняття відповідних технічних рішень регламентуються державними будівельними нормами, і вдосконалення цих норм можна вважати одним із найбільш важливих напрямків будівельної науки. Слід зауважити, що нормативна база сейсмостійкого будівництва у значній мірі залежить від можливостей комп'ютеризації, яка сьогодні вже стала звичайним способом проєктування. Вона надає розробникам норм можливість вдосконалювати розрахункові процедури, не зважаючи на проблему складності математичних операцій. Тут головним стає не чисельна складність того чи іншого розрахунку, а його точність, відповідність фізичному змісту і, що дуже важливо, зрозумілість для проєктувальника.

Прямий динамічний розрахунок, який слід використовувати при перевірці сейсмостійкості споруд, відносно недавно став робочим інструментом проєктувальника саме завдяки комп'ютеризації. В порівнянні з класичним розрахунком на базі лінійно-спектрального методу він потребує дещо більших обчислювальних витрат, але це не є стримуючим фактором, оскільки витрати машинного часу (що зросли, наприклад, від 40 хвилин до двох годин) ніяк не є вирішальними. А головні складнощі полягають у сфері методологічних питань, де накопичений досвід набагато менший, ніж при спектральних розрахунках. Відповідно, менш детальним є і нормативно-методичне забезпечення, і його вдосконалення стає однією з важливих наукових проблем.

У цій роботі ми торкнемося лише деяких рис прямого динамічного розрахунку, а саме методики побудови пакета розрахункових акселерограм і деяких рис процедури прямого інтегрування рівнянь динамічної рівноваги.

Слід зауважити, що ці проблеми вивчалися багатьма дослідниками і мають досить різноманітне освітлення у науково-технічній літературі. На даний момент запропоновано десятки підходів до моделювання сейсмічних вхідних даних. Найпростіші моделі сейсмічного входу з'явилися на початку минулого століття в процесі створення сучасної теорії сейсмотехніки, і досі існує запропонована тоді модель сейсмічного входу у формі затухаючої синусоїди [1 ÷ 3].

Автори перших моделей ставили задачу якісного аналізу сейсмічних коливань і не представляли свої моделі як розрахункові моделі для оцінки сейсмостійкості конструкції. Однак, з розвитком сейсмотехніки виникла потреба у створенні розрахункових моделей. Серед них з'явилися моделі, що побудовані на різноманітних ідеях.

Ідея використання записів реальних акселерограм заснована на думці, що вони краще являють собою реальну сейсмічну дію. Однак, для будь-якої реальної акселерограми можна підібрати схожу на неї, але більш небезпечну для споруди. Це пов'язано з тим, що в будь-якій реальній акселерограмі енергія впливу розподілена між багатьма частотами, а споруда реагує лише на деякі складові коливального процесу. Іншими словами, використання пакета реальних акселерограм порушує принцип вибору впливу найбільш несприятливого для споруди, що проєктується.

На думку низки дослідників більш розумним є моделювання впливу простими вузькосмуговими процесами, у яких енергія впливу сконцентрована в частотному діапазоні, небезпечному для споруди.

Ідея побудови одного широкосмугового проце-

су, який «обслуговує» всі споруди в усіх регіонах, здавалася дуже привабливою. Невипадково побудові універсального розрахункового впливу присвячено значну кількість досліджень інженерів-будівельників [4 ÷ 6]. Однак, відомі спроби побудови процесу не можна визнати цілком вдалими. Насамперед, широкосмугові синтетичні акселерограми моделюють прискорення та ігнорують зміщення та швидкості модального впливу.

МЕТА РОБОТИ

Аналіз нормативних вимог щодо перевірки сейсмостійкості споруд методом прямого динамічного розрахунку і розробка підходів щодо їх вдосконалення.

ПРО ОСОБЛИВОСТІ ВІТЧИЗНЯНИХ НОРМ

Згідно з діючими нормами [7] на базі прямих динамічних розрахунків слід проєктувати найбільш відповідальні споруди – об'єкти класу наслідків СС2 і СС3, будинки заввишки понад 26 поверхів, споруди заввишки 50 м і вище чи з прольотами понад 30 м, а також будівлі і споруди з принципово новими конструктивними рішеннями. При цьому норми вимагають, щоб значення переміщень і деформацій визначались з використанням нелінійного характеру роботи конструкції. На мій погляд, цей перелік вимог потребує дуже ретельного відношення до нормативного забезпечення вказаних розрахунків, з деталізацію методики таких розрахунків, багато особливостей котрої відсутні у вітчизняних нормах. Можливо, що для цього потрібна розробка окремого нормативного документу, наприклад, ДСТУ.

Взагалі, у нормах [7] розглядаються три методи розрахунку: 1 – спектральний метод, що може використовуватися при розрахунках будь-яких споруд; 2 – прямий динамічний метод, який рекомендований для найбільш відповідальних об'єктів; 3 – нелінійний статичний розрахунок з обмеженою сферою застосування. А текст норм [7] розподіляється таким чином, що спектральному методу присвячено 6,5 сторінок основного тексту і додаток Е на 4-х сторінках, динамічному методу присвячено 4 сторінки і нелінійному статичному розрахунку присвячені додатки Г і Д на 14 сторінках. Тобто, норми найбільш відповідальні і непрості питання висвітлюють дуже стисло, не розглядаючи важливих деталей.

Наприклад, відсутні вказівки щодо розмірів розрахункової області основи при розрахунках системи «основа – фундамент – надземна частина споруди» чи підземних споруд (для гідротехнічних споруд відповідні вимоги надаються), а також про розташування місця прикладення впливу акселерограми і необхідність її коригування при переносі з вільної поверхні ґрунту [8]. Не надано ніяких вказівок щодо граничних умов вказаної області основи.

Нічого не сказано про випадки, коли з результатів нелінійного розрахунку використовуються окремі (найчастіше екстремальні) елементи відгуку споруди, реалізація котрих частіше всього неодночасна, що потрібно враховувати при оцінках їхньої сумісної дії (наприклад, перевірки перекосу поверхів).

Також не надаються вимоги щодо складання набору розрахункових акселерограм, наприклад, вимоги до тривалості акселерограм чи обмеження кореляції для будь-якої їхньої пари з пакету.

ПОБУДОВА ПАКЕТУ АКСЕЛЕРОГРАМ

Аналіз історії нелінійного відгуку споруди на дію землетрусу, що надається прямим динамічним розрахунком, є найбільш реалістичним методом оцінки сейсмостійкості. Очевидно, що основною складністю методу є реалістична реалізація сейсмічних дій. Акселерограми, які використовуються в сейсмічному аналізі, повинні репрезентувати очікуваний (або проєктний) землетрус, тобто представляти всі можливі майбутні події на місці.

Сейсмічний вплив є яскраво вираженим випадковим процесом, реалізацією якого є відповідне сімейство реалізацій. Використання лише однієї акселерограми не відображає різноманіття можливих реалізацій випадкового сейсмічного впливу. За наявності кількох можливих центрів землетрусу невизначеність зростає. Звідси і з'являється необхідність проводити розрахунки на представницький набір акселерограм, який промоделює можливу різноманітність сейсмічного впливу.

Проблема відбору записів для формування розрахункового пакета акселерограм вирішується або через масштабування записаних природних рухів землі, або шляхом їх штучного створення. Були запропоновані різні підходи до відбору записів, наприклад, [9 ÷ 12]. Такі алгоритми шукають записи, які індивідуально або в середньому відповідають цільовому спектру. Автори роботи [13] запропонували алгоритм для вибору записів руху ґрунту з урахуванням мінливості критичних величин відгуку, а також з урахуванням властивостей досліджуваної структури.

Для умов України майже всюди можливо орієнтуватися на використання штучних акселерограм. У світовій практиці склалося два принципово різні підходи до генерації сейсмічних впливів: «під споруду» чи «під майданчик будівництва». Перший підхід передбачає завдання впливів без урахування особливостей споруди. При цьому акселерограма генерується під майданчик будівництва, використовуючи акселерограми минулих землетрусів або нормативну спектральну криву.

Саме такий спосіб передбачають вітчизняні норми [7], які потребують того, щоб розрахункові

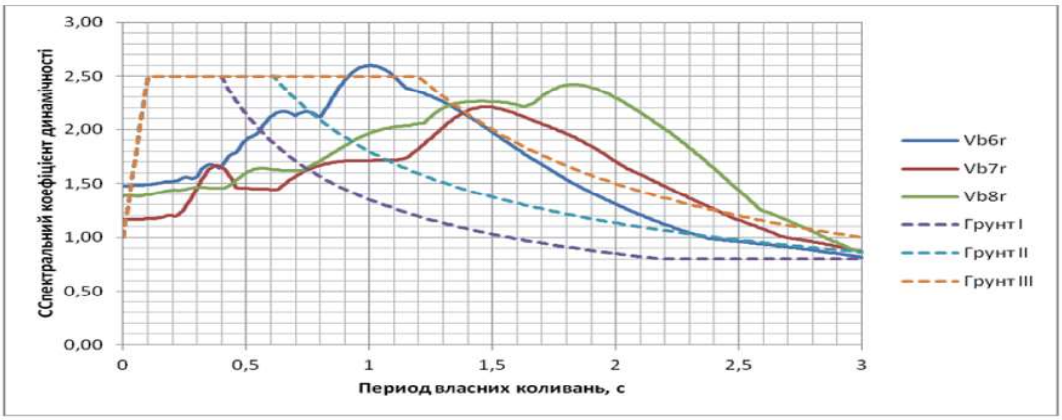

Рисунок 1 – Порівняння рекомендованих акселерограм зі спектральним коефіцієнтом динамічності

акселерограми будувалися «…на основі інструментальних записів сильних і проміжних за інтенсивністю землетрусів, зареєстрованих безпосередньо на будівельному майданчику або в умовах, близьких до умов майданчика будівлі або споруди, що проєктується», а коли відсутні інструментальні записи землетрусів, то для створення розрахункових акселерограм «…можуть використовуватися методи їх синтезування на основі графіків спектральних коефіцієнтів динамічності β».

Без урахування конкретного майданчика і також не враховуючи особливості споруди побудовані розрахункові акселерограми, комплект котрих був створений Інститутом геофізики імені С.І. Субботіна НАН України і увійшов у норми [7]. При цьому автори цієї розробки наполегливо рекомендують коректувати ці акселерограми з урахуванням фільтрувальних властивостей ґрунтів для конкретних майданчиків передбачуваного сейсмостійкого будівництва [14, 15], але ця думка у нормах проєктування не наводиться.

Тут доречно помітити (див. рис. 1), що ці акселерограми формально порушують умови пункту 6.4.4 [7], який вимагає, щоб на будь-якій частоті від 0,2 Гц до 33 Гц значення спектра реакцій синтезованої акселерограми не повинні відхилятися від відповідних значень стандартного спектра більш ніж на 10 %. Це порушення є виправданим, бо відповідає відомому факту наявності довгоперіодних складових коливань ґрунту при Бухарестському землетрусі 1977 року. І мабуть потрібно коригувати формулювання пункту 6.4.4, обмеживши відхилення від стандартного спектру лише у менший бік, як це надано у Єврокоді.

Існує альтернативний підхід, що має на увазі генерацію впливу під споруди, з урахуванням спектру їхніх власних частот [16]. В його основі лежить інженерний підхід, який виходить з того, що розрахунковий вплив підбирається найнебезпечнішим для споруди; при цьому вона може бути зовсім не схожа на реальну. Особливо слід зазначити, що такий підхід є єдиним можливим при типовому проєктуванні, коли сейсмологічні дані про майданчик будівництва фактично відсутні, а споруда має бути сейсмостійкою на будь-якому майданчику будівництва.

Тут слід зауважити, що майже завжди потрібно враховувати той факт, що споруда чутко реагує не на одну частоту, навіть якщо вона є головною з точки зору накопичення модальних мас, бо часто для різних конструктивних елементів споруди стають вирішальними різні частоти впливу. Тому видається досить сумнівним наведений у нормах [7] дозвіл «…виконувати розрахунок на вплив акселерограм еквівалентної одномасової системи,

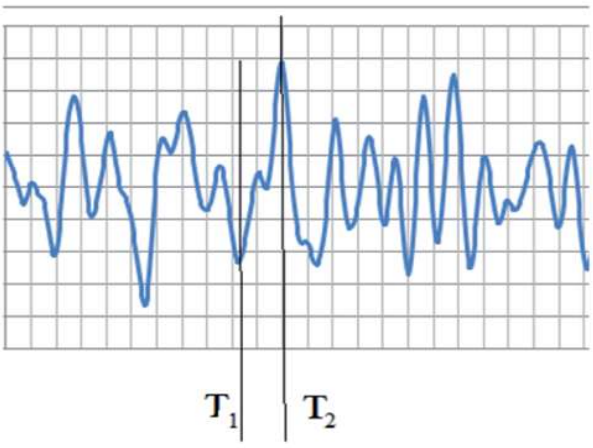

Рисунок 2 – Можливість одержати сумнівний результат

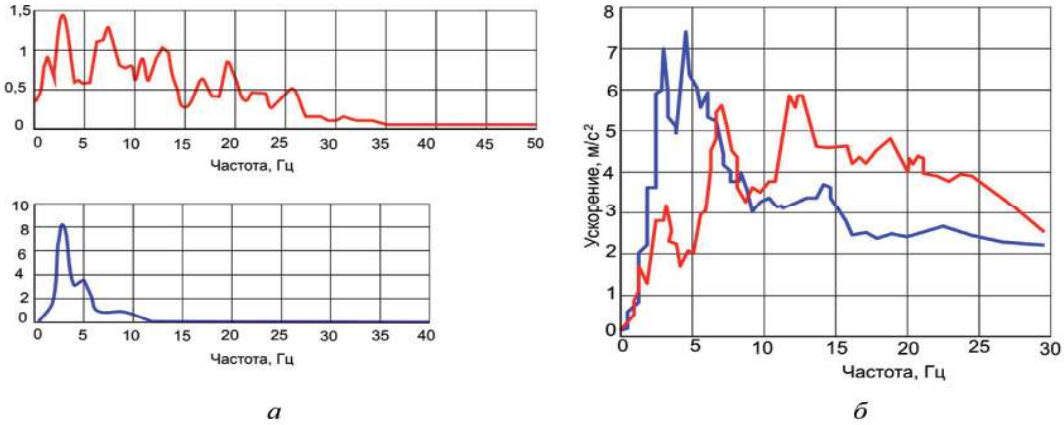

Рисунок 3 – До прикладу розрахунків: а - спектри Фур'є, б - реакція осцилятора

параметри якої…відповідають динамічній реакції просторової багатомасової моделі будівлі».

Крім того, слід враховувати, що відносно невеликі зміни динамічних характеристик системи або параметрів акселерограм можуть істотно змінювати реакцію системи на сейсмічну дію. Для споруд із близькими періодами коливань T_1 і T_2 коефіцієнти динамічності можуть істотно відрізнятися (див. рис. 2). Таким чином, одиничний динамічний розрахунок споруди на сейсмічні навантаження не тільки не дає достовірну інформацію про сейсмостійкість споруди, але скоріше дезорієнтує проєктувальника. Щоб уникнути такої ситуації найбільш природним є шлях використання не однієї, а кількох розрахункових акселерограм (ансамблю або пакета акселерограм).

Якщо вважати, що небезпека землетрусу пов'язана з кількістю енергії, яка спричиняє коливання конструкції, слід зазначити, що використання на практиці проєктування акселерограми з широким спектром часто не є коректним, оскільки енергія такої акселерограми розподілена по широкому діапазону частот. І хоча спектр такої акселерограми, як правило, покриває значення усіх вирішальних власних частот споруди, така акселерограма може не передавати ту кількість енергії, яку може передавати реальна акселерограма, якщо її домінантна частота близька до власних домінантних частот споруди.

Досить переконливий приклад наведено у роботі [17]. Розглянуто реакцію лінійного осцилятора зі своєю частотою 3 Гц на дію двох акселерограм, одна має широку спектральну характеристику (спектр Фур'є), друга – більш вузьку (див. рис. 3). Бачимо, що максимальне за абсолютним значенням переміщення осцилятора при дії акселерограми з широким спектром істотно менше реакції на акселерограму з вужчим спектром.

Кількість енергії, яка передана акселерограмою споруді, визначається співвідношенням частотних характеристик акселерограми та споруди (див. рис. 4). Заштрихована область характеризує енергію, що передається акселерограмою споруді. Наглядно представлено, що енергія, яка передається споруді, і, відповідно, реакція споруди на сейсмічну дію істотно залежить від співвідношення частотних характеристик акселерограми і споруди.

Тобто, будуючи пакет розрахункових акселерограм, необхідно відповісти умові щодо використання акселерограм з різними домінантними частотами та спектрами, які покривали би усі можливі частоти, які є небезпечними для споруди. Виконання цієї умови стає можливим, якщо у розрахунковому наборі акселерограм сумарно врахована можливість відповісти тим частотам, які викликають найбільшу реакцію споруди.

Для практичної реалізації такого підходу треба заздалегідь створити доступний проєктувальникам комплект 3-х компонентних акселерограм з домінантними частотами, напри-

Рисунок 4 – Частотні характеристики

клад, 0,5, 1,0, 1,5,..., 5,0 Гц. Тоді можна комплектувати розрахунковий пакет акселерограм, орієнтуючись на частоти власних коливань системи, або, як альтернативу, вважати розрахунковим пакетом весь цей комплект, не зважаючи на те, що деякі розрахунки будуть зайвими. При наявності акселерограм, які одержані під час сейсмічного мікрорайонування, вони також входять в розрахунковий пакет.

ПИТАННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ

Динамічні розрахунки на вплив акселерограм можна виконувати у лінійній чи у нелінійній постановці, хоча норми проєктування наполягають на використанні нелінійних розрахунків.

У разі динамічних розрахунків, базуючись на лінійних рівняннях, отримуємо оцінку переміщень та внутрішніх зусиль у конструкції аналогічно до тієї, яку отримуємо за лінійно-спектральною методикою. На додаток до цієї оцінки отримуємо зміну аналізованих факторів у часі, однак у розрахунках міцності фігурують лише максимуми цих факторів.

Але для лінійних систем існує й інший шлях розрахунку, коли на основі пакета розрахункових акселерограм будується спектр відповіді, який нормуванням на прискорення сили тяжіння перетворюється на спектральні коефіцієнти динамічності. З використанням цього графіка, замість наведеного в нормах, розрахунок виконується спектральним методом. Такий шлях розрахунку рекомендований, наприклад, посібником до норм Казахстану [18]. При цьому рекомендується використовувати не менше семи акселерограм та приймати середнє значення спектрів відповіді. В іншому випадку слід використовувати огинаючу спектрів відповіді.

Динамічні розрахунки, що враховують нелінійну поведінку споруди, повинні дати відповідь на питання, чи збережуться основні несучі елементи конструкції при сильних землетрусах. При цьому слід допускати можливість накопичення значних пошкоджень споруди та враховувати всі резерви її несучої здатності, зокрема ті, які пов'язані з роботою за межами пружності. І тут треба зауважити, що розрахункова модель повинна враховувати цю обставину і коректно висвітлювати діаграму роботи матеріалу.

Але слід пам'ятати, що представлені в нормах проєктування відповідних конструкцій діаграми роботи бетону і сталі призначені для перевірки несучої здатності за першою групою граничних станів при дії короткочасних (не динамічних!) навантажень. Крім того, зазначені діаграми роботи матеріалу відповідають дуже малій імовірності реалізації (порядку 10^{-3}). Імовірність того, що весь об'єкт складається з такого матеріалу, зникаюче мала, і її не слід брати до уваги при побудові розрахункової моделі споруди. Важливим є питання про гранично допустиму відносну деформацію, що визначає мить повної відмови матеріалу і виключення з роботи відповідного скінченого елемента.

Нелінійний розрахунок є суто перевірним і його розрахункова модель повинна мати всі відомості про конструкцію. Тут відсутній поділ між етапом визначення внутрішніх зусиль від розрахункових навантажень та етапом розрахунку перерізу. У такому розрахунку практично оцінюється опір всіх перерізів, і якщо деякі з них досягли граничного стану через текучість матеріалу, то надалі в них не збільшуються внутрішні зусилля, а опір конструкції зростаючому навантаженню забезпечується іншими елементами системи, які ще не досягли своєї межі за несучою здатністю. А при досягненні в процесі розрахунку значенням пластичної деформації величини граничної відносної деформації, відповідний скінченний елемент вимикається з роботи. Весь процес зупиняється при перетворенні конструкції на механізм (досягненні граничної несучої здатності системи).

На відміну від лінійного аналізу, де розрахунок на сейсмічний вплив виконується автономно, і його результати потім комбінуються з результатами розрахунків на інші впливи, в нелінійному розрахунку слід відразу врахувати всі навантаження, які входять у аварійне (сейсмічне) сполучення.

Це вимагає отримання коректного напружено-деформованого стану конструкції на момент часу перед початком землетрусу. Розрахунок проводиться або у статичній постановці, або у динамічній нелінійній постановці з поступовим лінійним навантаженням на проміжку часу, достатньому для нівелювання динамічних ефектів, або з підвищеним демпфуванням.

Тому, при використанні прямого інтегрування рівнянь руху нелінійний розрахунок на сейсмічну дію починається з того, що спочатку (наприклад, протягом першої секунди) до конструкції прикладаються монотонно зростаючі від нуля до своїх кінцевих значень залучені до аварійного сполучення постійні та тимчасові навантаження з відповідними коефіцієнтами поєднань згідно з таблицею 6.1 [7], і лише після цього до будівлі один за одним з розрахункового пакету прикладаються задані частоти трикомпонентної акселерограми.

Якщо процес дійде до кінця (не зафіксовано глобального обвалення будівлі або її частин), можна стверджувати, що будівля має деякий запас сейсмостійкості. Визначити значення такого запасу можливо повторюючи розрахунок з використанням масштабного множника $K > 1$, що підвищує значення прискорень у акселерографах розрахункового пакету. Методом послідовних наближень визначається найбільше значення

шуканого коефіцієнта, при якому немає обвалення. Таким чином, (у разі потреби) визначається коефіцієнт запасу сейсмостійкості даної будівлі.

Мабуть є доцільним, щоб після прямого динамічного розрахунку виконувався розрахунок на проєктний землетрус з врахуванням залишкових деформацій, які з'явилися внаслідок роботи системи у режимі максимального розрахункового землетрусу. Тоді стане зрозумілим, чи потребує споруда ремонту і наскільки великим такий ремонт може бути.

КОРОТКІ ВИСНОВКИ

У роботі пропонується дещо незвичний спосіб побудови пакета розрахункових акселерограм, який, на думку автора, гарантує більшу надійність прямих динамічних розрахунків. Вказується, що такому розрахунку, орієнтованому на проєктування найбільш відповідальних споруд, слід надати більшої уваги і, можливо, розробити для цього спеціальний нормативно-методологічний документ.

Запропонований підхід щодо прямого динамічного розрахунку, а також деякі надані зауваження, доцільно враховувати при побудові тих ДСТУ, що будуть розроблятися у розвиток ДБН «Будівництво в сейсмічних районах України. Основні положення».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Y., Chen B., Pin G., Parisini T. Estimation of Damped Sinusoidal Signals: an Observer-Based Approach. IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, Issue 1. P. 3811-3816.
2. Zhou J., Tang K., Wang H., Fang X. Influence of Ground Motion Duration on Damping Reduction Factor. Journal of Earthquake Engineering. 2014. Vol. 18, Issue 5. P. 816–830.
3. Yamamoto M., Sato Y., Inoue S. Extraction method using sinusoidal waves to simplify earthquake ground motion. Japan Architectural Review. 2018. Vol. 1, Issue 3. P. 322–330.
4. Jonson G.R., Epstein H.R. Short duration Analytic Earthquake. Proc. of the ASCE. 1976. № 102 (N ST5). P. 993-1001.
5. Savinov O.A., Uzdin A.M., Sandovich T.A., Dolgaya A.A. Consideration of the characteristics of seismic effects in selecting parameters for earthquakeproof foundation designs. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1995. Vol. 32, Issue 4. P. 124–129.
6. Léger P., Leclerc M. Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams. Engineering Structures. 1996. Vol. 18, Issue 3. P. 227–239.
7. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с.
8. Schnabel P., Bolton Seed H., Lysmer J., Modification of seismograph records for effects of local soil conditions. Bulletin of the Seismological Society of America. 1972. № 6 (6). P. 1649–1664.
9. Dussom K.B., Hadj-Hamou T., Bakeer R. QUAKE: An expert system for the selection of design earthquake accelerogram. Computers and Structures. 1991. Vol. 40, Issue 1. P. 161–167.
10. Katsanos, E.I., Sextos, A.G. and Manolis, G.D. Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010. № 30. P. 157-169.
11. Naeim F., Alimoradi A., Pezeshk S. Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. Earthquake Spectra. 2004. Vol. 20, Issue 2. P. 413–426.
12. Georgioudakis M., Fragiadakis M., Papadrakakis M. Multi-criteria selection and scaling of ground motion records using Evolutionary Algorithms. Procedia Engineering. 2017. № 199. P. 3528-3533.
13. Katsanos E.I., Sextos A.G. ISSARS. An integrated software environment for structure-specific earthquake ground motion selection. Advances in Engineering Software. 2013. № 58. P. 70–85.
14. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Встановлення спектральних характеристик ґрунтової товщі при проектуванні сейсмостійких будинків і споруд. Наука і будівництво. 2015. №4. С. 48-50.
15. Дорофєєв В.С., Єгупов К.В., Єгупов В.К., Кендзера О.В., Немчинов Ю.І., Семенова Ю.В., Сорока М.М. Особливості визначення навантажень і впливів на об'єкти підвищеного класу відповідальності. Наука і будівництво. 2017. № 34(14). С. 11-19
16. Ivanova T.V., Guan J., Nesterova O.P., Prokopovich S.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M., Ivashintzov D.A. Modeling the design seismic input in conditions of limiting seismological information. Magazine of Civil Engineering. 2017. № 7. P. 129–138.
17. Mkrtychev O.V., Lokhova E.M. Design of Earthquake-Resistant Buildings. New Generation Standards. Housing Construction. 2024. № 4. P. 42-46.
18. НТП РК 08-01.1-2017 (к СП РК EN 1998-1:2004/2012). Проектирование сейсмостойких зданий и сооружений. Общие положения. Сейсмические воздействия. Астана:

РГП «КазНИИССА», 2017.

REFERENCES

1. Wang, Y., Chen, B., Pin, G., & Parisini, T. (2017). Estimation of damped sinusoidal signals: An observer-based approach. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 3811–3816.
2. Zhou, J., Tang, K., Wang, H., & Fang, X. (2014). Influence of ground motion duration on damping reduction factor. Journal of Earthquake Engineering, 18(5), 816–830.
3. Yamamoto, M., Sato, Y., & Inoue, S. (2018). Extraction method using sinusoidal waves to simplify earthquake ground motion. Japan Architectural Review, 1(3), 322–330.
4. Jonson, G. R., & Epstein, H. R. (1976). Short duration analytic earthquake. Proceedings of the ASCE, 102(N ST5), 993–1001.
5. Savinov, O. A., Uzdin, A. M., Sandovich, T. A., & Dolgaya, A. A. (1995). Consideration of the characteristics of seismic effects in selecting parameters for earthquake-proof foundation designs. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 32(4), 124–129.
6. Léger, P., & Leclerc, M. (1996). Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams. Engineering Structures, 18(3), 227–239.
7. DBN V.1.1-12:2014. (2014). Construction in seismic regions of Ukraine. Kyiv: Minregionbud of Ukraine.
8. Schnabel, P., Seed, H. B., & Lysmer, J. (1972). Modification of seismograph records for effects of local soil conditions. Bulletin of the Seismological Society of America, 62(6), 1649–1664.
9. Dussom, K. B., Hadj-Hamou, T., & Bakeer, R. (1991). QUAKE: An expert system for the selection of design earthquake accelerogram. Computers and Structures, 40(1), 161–167.
10. Katsanos, E. I., Sextos, A. G., & Manolis, G. D. (2010). Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 157–169.
11. Naeim, F., Alimoradi, A., & Pezeshk, S. (2004). Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. Earthquake Spectra, 20(2), 413–426.
12. Georgioudakis, M., Fragiadakis, M., & Papadrakakis, M. (2017). Multi-criteria selection and scaling of ground motion records using evolutionary algorithms. Procedia Engineering, 199, 3528–3533.
13. Katsanos, E. I., & Sextos, A. G. (2013). ISSARS: An integrated software environment for structure-specific earthquake ground motion selection. Advances in Engineering Software, 58, 70–85.
14. Kendzera, O. V., & Semenova, Yu. V. (2015). Determination of spectral characteristics of soil layers during the design of earthquake-resistant buildings and structures. Science and Construction, (4), 48–50.
15. Dorofeev, V. S., Yehupov, K. V., Yehupov, V. K., Kendzera, O. V., Nemchinov, Yu. I., Semenova, Yu. V., & Soroka, M. M. (2017). Features of determining loads and impacts on high-responsibility structures. Science and Construction, (34/14), 11–19.
16. Ivanova, T. V., Guan, J., Nesterova, O. P., Prokopovich, S. V., Smirnova, L. N., Uzdin, A. M., & Ivashintzov, D. A. (2017). Modeling the design seismic input in conditions of limiting seismological information. Magazine of Civil Engineering, (7), 129–138.
17. Mkrtychev, O. V., & Lokhova, E. M. (2024). Design of earthquake-resistant buildings. New generation standards. Housing Construction, (4), 42–46.
18. NTP RK 08-01.1-2017 (to SP RK EN 1998-1:2004/2012). (2017). Design of earthquake-resistant buildings and structures. General provisions. Seismic actions. Astana: RGP "KazNIISSA."

Стаття надійшла до редакції 14.01.2025
Перевірено 30.01.2025
Прийнято 19.02.2025