

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.14:699.84

Г. Е. ГУСЛИСТА^{1*}, Д. С. ЯРОШЕНКО²

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 44 17, ел. пошта GuslystaAnna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 16 56, ел. пошта yaroshenko.denis.1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2494-6082

ДИНАМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОШКОДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Мета. Проаналізувати наявні нормативні та наукові публікації щодо положень розрахунків на аварійні навантаження, пов'язані зі стійкістю до прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, та динамічного впливу на будівельну конструкцію локального структурного пошкодження її елемента (відмови). Дослідити динамічний вплив на будівельну конструкцію локального структурного пошкодження її елемента шляхом лабораторного експерименту і числового моделювання. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було проведено огляд існуючих нормативних документів різних країн і наукових публікацій щодо розрахунку та проектування будівель і споруд, стійких до прогресуючого обвалення. Було створено лабораторний стенд та проведено експериментальні та числові дослідження динамічної поведінки моделі будівельної конструкції. Лабораторний стенд було реалізовано у вигляді статично невизначуваної системи, так, щоб локальна відмова частини конструкції не призводила до руйнування всієї структури, а лише до якісної зміни її конфігурації. **Результати.** Під час лабораторного експерименту реєструвалися віброприскорення і вібропереміщення характерної точки конструкції. Шляхом обробки віброграм були отримані значення частот і логарифмічних декрементів вільних затухаючих коливань експериментального стенда, а також значення динамічного коефіцієнта при різних рівнях навантажень і видах відмов. Експериментальні дані перевірялись також числовим моделюванням. **Наукова новизна.** Проведені дослідження дозволяють оцінити динамічний вплив на конструкцію локальних структурних пошкоджень двох видів. Було виявлено, що навіть при співставних значеннях динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов величини динамічних переміщень і прискорень можуть відрізнятися в декілька разів. **Практична значимість.** Отримані результати свідчать про те, що у випадках повних відмов елементів конструкцій вони отримують більші значення динамічних коефіцієнтів (напружень і прискорень), ніж конструкції, у яких відмови додаткових елементів супроводжуються частковим збереженням їхньої працездатності. У такому разі, в практичних, інженерних розрахунках, можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності.

Ключові слова: локальне пошкодження; динамічний коефіцієнт; лабораторний експеримент; логарифмічний декремент коливань; віброприскорення; вібропереміщення

Вступ

Останніми роками все більше уваги приділяється проблемі безпеки будівель та споруд. Адже аварії об'єктів будівництва призводять до суттєвих економічних і людських жертв. Дуже часто причинами аварій стають вибухи, пожежі, землетруси, несподівані руйнування опор внаслідок якихось не передбачених нормативними документами впливів. В цій ситуації будівлі та споруди, запроектовані без урахування подібних навантажень та впливів, виявляються

не здатними протидіяти можливному лавиноподібному (прогресуючому) обваленню.

В інженерному середовищі зустрічається такий підхід до розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення: після того, як завершено розрахунок певного каркасу за основними сполученнями навантажень і впливів, проводиться додатковий розрахунок, у якому просто видаляється певний конструктивний елемент із розрахункової схеми (Руденко, Д. В., & Руденко, В. В., 2009). При цьому причина такого «видалення» і його можливий динамічний ефект можуть і не враховуватися. Аби цьому

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

запобігти, сучасні норми проєктування мають містити однозначні додаткові вимоги щодо розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок локального пошкодження.

По-перше, огляд існуючих рекомендацій щодо розрахунку та проєктування дозволяє відмітити дуже багато спільного між підходами при розрахунку на сейсміку та на прогресуюче обвалення. Адже метою розрахунків на стійкість до прогресуючого руйнування є розробка таких конструктивних рішень будівель, щоб виключення певного елемента не призводило до непропорційного лавиноподібного руйнування всієї будівлі загалом. Тут прослідковується чітка аналогія з вже відомими і колись досліджуваними спорудами, що мають в'язі, які виключаються, для сейсмічних районів (Айзенберг, 1976). Ці споруди мають резервні зв'язки, які повинні виключитись з роботи за задумом проєктувальника. І їх виключення не має призвести до руйнування всієї споруди в цілому завдяки перебудові внутрішньої структури системи.

По-друге, аналіз чинних на сьогодні вітчизняних та закордонних нормативних документів дозволяє виділити американські норми (UFC 4-023-03, 2016) як найбільш «насичені» та найбільш цікаві для ознайомлення. На їхньому фоні норми інших країн значно відстають. При цьому особливої уваги в американських нормах заслуговують підрозділи, що стосуються врахування впливу динамічного ефекту під час прогресуючого руйнування та дані про коефіцієнти динамічності.

Справа в тому, що прогресуюче руйнування є наслідком відмови певного елемента або елементів конструкції. При цьому відмова може бути миттєвою, а може тривати певний період часу ($t_{\text{відмови}}$) залежно від причини цієї відмови. Згідно з прийнятими позначеннями (Дробот, 2020a; Дробот, 2020b) $t_{\text{відмови}}$ – це час відмови, впродовж якого конструкція, отримавши «негативний імпульс», «зависає» в своєму вихідному положенні за рахунок сил інерції, а потім починає рух вже в пошкодженому вигляді. При $t_{\text{відмови}}$ більше ніж 1...1,5 с динамічний сплеск зусиль після руйнування елемента стає несуттєвим і задачу можна розв'язувати в квазістатичній постановці, яка передбачає врахування коефіцієнта динамічності ($k_{\text{дин,мак}} \leq 1,25$). Наприклад, при квазістатичному розрахунку в ПК ЛПА (Кулябко, & Ярошенко, 2012; Гуслиста,

Кожанов, & Ярошенко, 2019) до розрахункової моделі прикладаються два завантаження. В першому завантаженні моделюються всі постійні та довготривалі навантаження на конструкцію, а в другому задається певний коефіцієнт динамічності. Для цього у вузол зруйнованого елемента задається зусилля, що дорівнює певній частині від зусилля в цьому елементі від сполучень попередніх завантажень. Потім за допомогою «Монтажних таблиць» моделюються стадії обвалення.

Слід зазначити, що призначення певного коефіцієнта динамічності при квазістатичному методі здійснюється майже навмання. До того ж не завжди $t_{\text{відмови}}$ менше ніж 1...1,5 с.

Отже, більш точним, а іноді і єдином можливим є динамічний розрахунок конструкцій на прогресуюче обвалення, який враховує швидкість руйнування певного елемента, тобто враховує час відмови $t_{\text{відмови}}$.

Отже, врахування фактору динаміки є на сьогодні дуже актуальним і існує багато робіт закордонних авторів, присвячених цьому питанню, а також визначенню динамічних коефіцієнтів (Mahmoudi, Teimoori, & Kozani, 2015; Mashhadiali, Kheyroddin, & Zahiri-Hashemi, 2016; Zhu, Chen, Yao, Keer, & Huang, 2018; Kong, Yang, Yang, & Zhou, 2020).

Українська нормативна література по темі прогресуючого обвалення представлена двома нормативними документами. ДБН В.1.2-14:2018 (2018) застосовує термін непропорційне (лавиноподібне) руйнування і вказує, для яких об'єктів слід виконувати розрахунки на непропорційні руйнування, а також приводить перелік заходів щодо зменшення імовірності таких руйнувань та їхніх наслідків. ДБН В.2.2-41:2019 (2019) надає більше конкретної інформації щодо проєктування стійких до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Цей нормативний документ дає рекомендації стосовно вибору конструктивних схем, об'ємно-планувальних і технічних рішень, методу розрахунку. Але більшість з цих рекомендацій стосується переважно сталевих конструкцій. Запропонований українськими нормами метод розрахунку на прогресуюче обвалення є квазістатичним з коефіцієнтом динамічності не менше ніж 1,2 для конструкцій категорії А.

Аналіз публікацій та нормативної літератури свідчить про те, що досі немає ясності, якими мають бути величини динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов.

Мета

Метою дослідження є визначення динамічного впливу на певну будівельну структуру відмови її елемента шляхом лабораторного експерименту і числового моделювання. Під відмовою тут мається на увазі виключення з роботи якогось елемента конструкції, при цьому вся конструкція отримує додаткові прогини (статичні і динамічні), але в цілому зберігає свою працездатність (цей елемент в подальшому називатимемо «додаткова конструкція»). Тобто лабораторний стенд планувався таким чином, що відмова додаткової конструкції не призводить до руйнування всієї структури, а лише до якісної зміни її конфігурації. В прийнятих термінах (Аугусти, Баратта, & Кашиати, 1988) досліджувана система відноситься до систем з «безпечною відмовою», коли при досягненні граничного стану в певній точці або елементі відбувається перерозподіл напружень і конструкція зберігає здатність сприймати додаткові навантаження.

Методика

Мірою динамічного впливу на конструкцію аварійної ситуації, спричиненої відмовою її елемента, було обрано динамічний коефіцієнт, як відношення максимального динамічного прогину індикативної точки конструкції до її статичного прогину після повного затухання коливань, збурених зміною схеми конструкції. Для визначення можливого діапазону значень динамічного коефіцієнта при різних видах відмов було обрано дві схеми відмови конструкції:

1) перший варіант відмови – «м'який». Відмова додаткового конструктивного елемента спричиняється втратою його стійкості, що ініціюється раптово прикладеним додатковим навантаженням. При цьому додатковий конструктивний елемент (у даному випадку – стійка з великою гнучкістю) не виключається з роботи повністю, а лише змінює її характер, переходячи від рівноважного стану першого роду до рівноважного стану другого роду. При цьому стійка отримує великі поперечні деформації, але все ще здатна сприймати частину навантажень від основної структури і передавати її на опору. Такий варіант відмови може розглядатись як спосіб моделювання випадку падіння частини перекриття на розташовані нижче

конструкції з частковим зменшенням їх несучої здатності. В лабораторному експерименті конструкція навантажувалася початковим зосередженим навантаженням, що не було критичним з точки зору втрати стійкості додаткової конструкції (відстань від опори консолі – 480 мм, загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1). Таким чином, вся конструкція спочатку перебувала у стані рівноваги. Потім раптово прикладалося додаткове навантаження у ту ж точку, при цьому сумарне навантаження вже ставало критичним для стійки і вона втрачала стійкість.

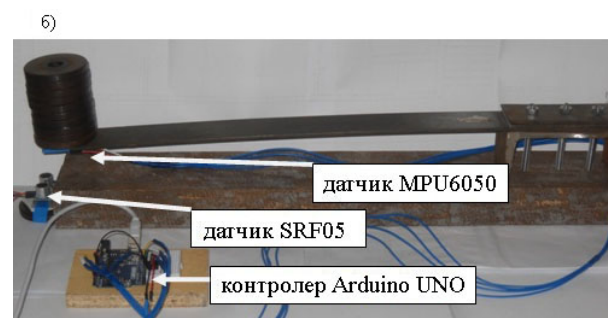
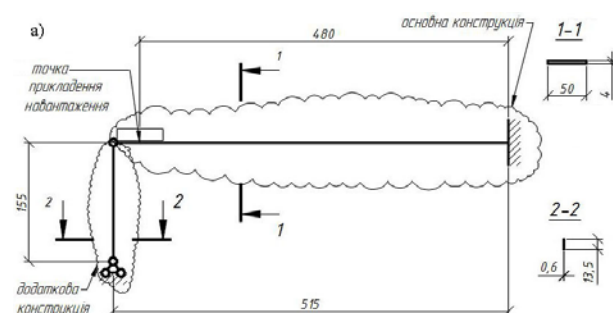


Рис. 1. Експериментальна конструкція:

- а) розрахункова схема експериментальної конструкції;
б) загальний вигляд експериментальної балки зі встановленими датчиками та контролером Arduino UNO

2) другий варіант відмови – «жорсткий» – майже миттєве (час вимкнення в декілька разів менше періоду власних коливань конструкції, отриманої внаслідок відмови) і повне виключення додаткового конструктивного елемента з роботи при постійному рівні навантаження. При такому варіанті відмови змінюється лише жорсткість системи.

Стенд для лабораторних досліджень. Основна конструкція, поведінка якої досліджується при відмові певного конструктивного елемента

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

– консольна балка з додатковою опорою. Параметри консольної балки такі: довжина 515 мм, відстань від затиснення до центра ваги зосередженої маси – 480 мм, переріз – прямокутний 50×4 мм, матеріал – Ст. 3. Додаткова опора – шарнірно обперта вертикальна стійка, що розташована на кінці консольної балки. Висота стійки – 155 мм, переріз – 0,6×13,5 мм, матеріал – Ст. 3. Як видно з параметрів стійки (гнучкість у напрямку найменшої жорсткості близько 900), це дуже гнучка конструкція, втрата стійкості якої не супроводжуватиметься помітними пластичними деформаціями при обраних параметрах системи. Для завантаження конструкції застосовувалися сталеві шайби масою 0,25 кг кожна.

Під час лабораторного експерименту реєструвалися віброприскорення та вібропереміщення характерної точки конструкції (кінець консольної балки). Шляхом обробки віброграм були отримані значення частот і логарифмічних декрементів вільних затухаючих коливань експериментального стенда, а також значення динамічного коефіцієнта у кожному конкретному випадку. Експериментальні дані перевірялись також числовим моделюванням (використовувався програмний комплекс SCAD Office 21.1). Для реєстрації реакції балки застосовувалось таке обладнання: персональний комп'ютер, контролер Arduino UNO, датчик прискорень MPU6050 і ультразвуковий датчик дистанції SRF05 (використовувався для контролю статичних прогинів кінця консольної балки). Вибір переліченого обладнання для проведення експериментальної частини роботи було зумовлено його доступністю та прийнятною точністю.

Датчик прискорень MPU6050 використовує п'єзоелектричний ефект і дозволяє реєструвати та передавати на комп'ютер значення прискорень і кутових переміщень по трьох взаємно перпендикулярних осях (таким чином, датчик має 6 ступенів вільності – 3 лінійні і 3 кутові). Однак такі датчики потребують калібрування, оскільки їх чутливий елемент може бути змонтовано на плату з певними відхиленнями, тому на підготовчому етапі було проведено калібрування датчика прискорень. Деякі прийоми цього процесу описані в спеціальній літературі (Капля, Савицкий, & Мاستиков, 2018; Редченко, 2013; Редченко, 2014; Жмудь, Кузнецов, Кондратьев, Трубин, & Трубин, 2018). Програ-

мна реалізація взаємодії датчиків MPU6050 і SRF05 з контролером Arduino і комп'ютером також описана різними авторами (Карвінен, Т., Карвінен, К. & Валтокари, 2015; Монк, 2017). Дані з датчиків зчитувались з кроком 0,004 с.

Результати

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1. Отримані експериментальні дані розбиті на два блоки – для першого і для другого варіантів відмови.

В табл. 1 прийняті такі позначення:

ω – частота вільних затухаючих коливань;

δ – логарифмічний декремент;

μ – динамічний коефіцієнт;

Δ_D – максимальний динамічний прогин індикативної точки конструкції після вимкнення додаткового елемента;

Δ_S – максимальний статичний прогин індикативної точки конструкції після вимкнення додаткового елемента.

Колонка «Зосереджене навантаження» розбита на 3 стовпчики:

« m_0 » – початкове значення маси в точці прикладення навантаження (див. рис. 1, а), що для першого варіанта відмови відповідає стану статичної рівноваги;

« m_s » – для першого варіанта відмови ϵ , так би мовити, ініціюючим навантаженням, при якому стійка втрачає стійкість;

« m_Σ » – значення маси, що залишається в точці прикладення навантаження після відмови елемента конструкції.

Експериментально було встановлено, що *логарифмічний декремент* вільних затухаючих коливань консольної балки *без додаткової стійки змінюється несуттєво* в межах 0,0115...0,0123 в залежності від величини зосередженої маси на кінці консолі (розглядався діапазон навантажень від 1,75 кг до 2,5 кг, що відповідає діапазону навантажень за першим і другим варіантами відмов). *Питання залежності величин логарифмічних декрементів від частоти вільних коливань або напружень в елементах конструкцій в цій роботі не розглядається.*

Логарифмічні декременти системи з *додатковою стійкою* виявилися в 1,4...2,5 рази вищими, але діапазон їх змін більш широкий (див. табл. 1).

Результати експериментальних досліджень

Варіант відмови	№ з/п	Зосереджене навантаження, кг			Показники вільних затухаючих коливань		Максимальний прогин, мм		μ
		m ₀	m _s	m _Σ	ω, Гц	δ	Δ _D	Δ _S	
Перший	1	0,5	1,25	1,75	4,637	0,029	5,196	4,558	1,14
	2	0,5	1,5	2	4,113	0,028	8,564	5,254	1,63
	3	0,5	1,75	2,25	3,797	0,016	10,800	5,95	1,815
	4	1	0,75	1,75	4,637	0,029	6,892	4,558	1,512
	5	1	1	2	4,113	0,028	10,172	5,254	1,936
	6	1	1,25	2,25	3,797	0,016	11,010	5,95	1,85
Другий	7	1,75	0	1,75	4,133	0,0123	30	15,25	1,97
	8	2	0	2	3,913	0,0120	33,8	17,07	1,983
	9	2,25	0	2,25	3,733	0,0115	37,5	18,9	1,982

Характерний вигляд експериментальних акселерограм наведено на рис. 2. В легенді графіка наведено номер експериментальної віброграми відповідно до значень колонки «№ з/п» табл. 1. Перехідний процес, що відповідає часу прикладення навантаження і процесу втрати

стійкості стійки займає до 0.1 с. Із якісного аналізу графіка видно, що частота і логарифмічний декремент коливань для варіантів «3» і «6» однакові, а прискорення у стаціонарному режимі вільних затухаючих коливань відрізняються на певну сталу величину.

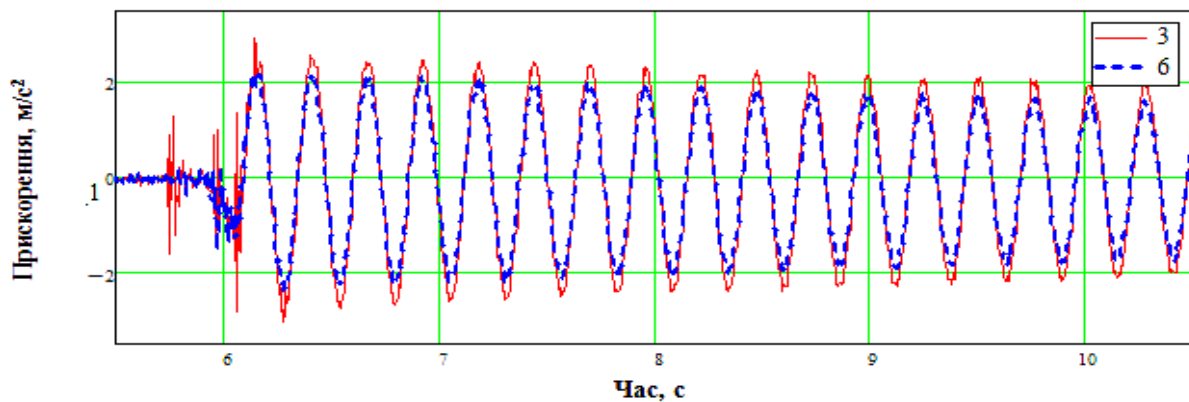


Рис. 2. Характерний вигляд експериментальних акселерограм для першого варіанта відмов

У графічному вигляді результати експериментальних досліджень наведено на рис. 3, де легенда графіка відповідає графі «№ з/п» табл. 1. Результати представлені у вигляді залежності величини динамічного коефіцієнта від частоти вільних затухаючих коливань системи після відмови елемента конструкції.

Окрім експериментальних досліджень було проведено числове моделювання відмов моделі конструкції засобами програмного комплексу © Г. Е. Гуслиста, Д. С. Ярошенко, 2020

SCAD Office 21.1. Основна мета такого моделювання – перевірити принципову можливість моделювання таких аварійних впливів на будівельні конструкції, як відмови її частин, одним із найбільш популярних програмних комплексів, що використовуються вітчизняними інженерами. Використовувався модуль, що реалізує пряме інтегрування рівнянь руху скінченно-елементної моделі. Нажаль, авторам не вдалося отримати результати в геометрично нелінійній

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

постановці у часовій області за першим варіантом відмов, що можна було б співставляти з експериментальними даними.

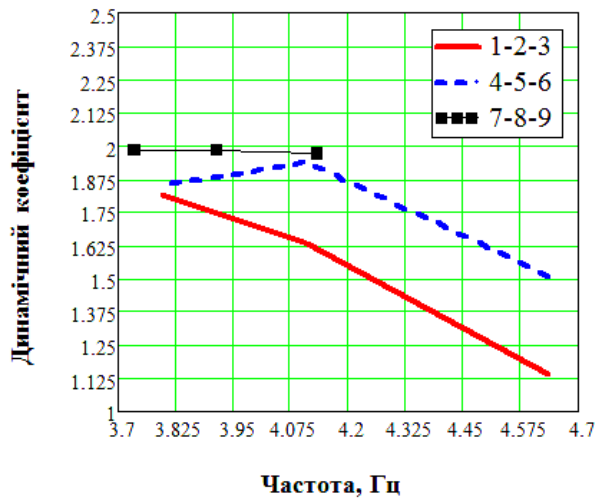


Рис. 3. Залежність зміни динамічних коефіцієнтів від величини частоти вільних затухаючих коливань конструкції за різними варіантами відмов

Проте за більш простішим з точки зору моделювання другим варіантом було отримано майже повну відповідність експериментальних і числових результатів (рис. 4). На рис. 4 при-

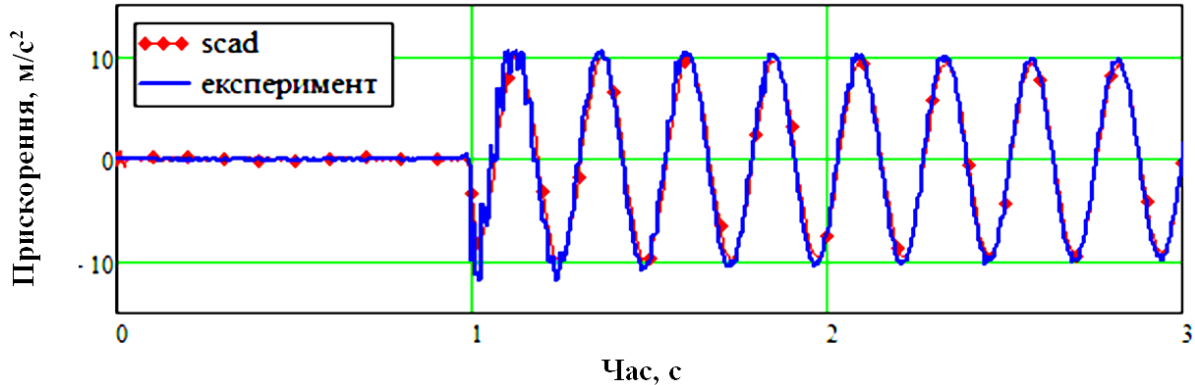


Рис. 4. Фрагмент експериментальної і отриманої числовим методом акселерограми процесу коливань, збурених відмовою додаткового елемента за другим варіантом

Як видно із графіків рис. 2 і рис. 4 динамічні прискорення, що супроводжують відмови конструкцій, при прийнятих параметрах в даній роботі, суттєво відрізняються при досить близьких значеннях динамічних коефіцієнтів (див. акселерограми рис. 2 і рис. 4). При значеннях динамічних коефіцієнтів, що змінюються в діапазоні 1,815...2,0, значення прискорень відрізняються майже в 4 рази (від 2...2,5 м/с² для варіантів відмови зі стійкою 3 і 6 до близько

ведено фрагмент експериментальної (в легенді графіка «експеримент») і отриманої числовим методом (в легенді графіка «scad») акселерограми процесу коливань, збурених відмовою за другим варіантом (п. 7 табл. 1).

Моделювання відмови конструкції в ПК SCAD Office 21.1 відбувалося таким чином: при прийнятій схемі навантажень конструкції була обчислена опорна реакція в елементі, відмова якого моделюється. На наступному етапі даний елемент (або в'язь, що його моделює) видаляється із розрахункової схеми, натомість прикладається динамічне навантаження, що спочатку дорівнює опорній реакції елемента, а потім за певним законом зменшується до нуля. «Різкістю» зміни значення даного динамічного навантаження від повної величини опорної реакції до нуля можна моделювати різні варіанти вимкнення певного елемента із роботи. У даному випадку динамічне навантаження змінювалося різко (відповідно до прийнятого кроку інтегрування – 0,001 с). Логарифмічний декремент коливань задавався відповідно до попередньо визначеного експериментального значення.

10 м/с² для варіанта відмови). Тобто в перехідному процесі відбувався короточасний відрив маси (що не закріплювалася, а просто лежала на поверхні балки) від поверхні балки (що і спостерігалось під час експериментів (див. п. 7, 8, 9 табл. 1). Така різниця в прискореннях пояснюється такою ж різницею в динамічних прогинах конструкцій за двома варіантами відмов (див. табл. 1).

Наукова новизна та практична значимість

Динамічні коефіцієнти, як відношення максимального динамічного переміщення певної точки конструкції до її статичного переміщення внаслідок певного динамічного навантаження, в залежності від виду відмов можуть змінюватися в досить широкому діапазоні значень і залежать від виду відмови. Тому при необхідності розрахунків будівельних конструкцій на прогресуюче обвалення, пропонується враховувати очікуваний вид відмови і конструктивні особливості споруд, що проєктуються стійкими до прогресуючого обвалення. Дане твердження підтверджується тим, що навіть при співставних значеннях динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов величини динамічних прискорень можуть відрізнитися в декілька разів. Було виявлено, що системи, у яких відбувалася повна відмова додаткового елемента отримують більші динамічні переміщення (а, отже, напруження і прискорення), ніж системи з неповним виключенням додаткового елемента. До того ж, наявність такого «недозруйнованого» елемента може підвищувати логарифмічний декремент конструкції, що, у свою чергу, полегшує роботу конструкції при динамічних навантаженнях. Також слід відмітити більш широкий діапазон змін значень динамічних коефіцієнтів та логарифмічних декрементів коливань у системі з неповним виключенням додаткового елемента (тут, перший варіант відмови), що пояснюється суттєвою нелінійністю роботи додаткового елемента конструкції (геометричною, оскільки відбулася втрата стійкості, фізичною – тертя в опорних вузлах і пластичні деформації стержня елемента).

Отримані результати свідчать про те, що у випадках повних відмов елементів конструкцій, вони отримують більші значення динамічних коефіцієнтів (напружень і прискорень), ніж конструкції, у яких відмови додаткових елементів супроводжуються частковим збереженням їхньої працездатності. У такому разі, в практичних, інженерних розрахунках, можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності. Також була показана принципова можливість моделювання аварійних ситуацій у вигляді повного раптового виключення додаткового конст-

тивного елемента засобами одного із програмних комплексів на базі МСЕ у часовій області.

Висновки

У даній роботі досліджувався динамічний вплив на певну структуру відмови її елемента. Результати аналізу нормативних документів і наукових публікацій, а також лабораторних та числових досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1) аналіз публікацій та нормативної літератури свідчить про те, що вітчизняна нормативна база відстає від закордонних аналогів щодо роз'яснень положень розрахунків на аварійні навантаження, пов'язані зі стійкістю до прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, досі немає ясності, якими мають бути величини динамічних коефіцієнтів при різних видах відмов;

2) у залежності від виду відмови динамічний вплив на будівельну конструкцію може суттєво відрізнитися навіть при різних варіантах відмови одного і того ж конструктивного елемента (наприклад, повне і різке руйнування або більш плавне, неповне руйнування, що супроводжується лише частковим виключенням елемента із роботи);

3) оскільки у випадках повних відмов елементів конструкцій, вони отримують більші динамічні переміщення (напруження) і прискорення, в практичних розрахунках можна обмежитися розглядом саме таких повних відмов критичних елементів конструкцій, а можливість їхнього неповного виключення з роботи може бути віднесена в запас несучої здатності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- GSA *Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance* (2016).
- Kong, D.-Y., Yang, Y., Yang, B., & Zhou, X.-H. (2020). Experimental Study on Progressive Collapse of 3D Steel Frames under Concentrated and Uniformly Distributed Loading Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 146(4).
- Mahmoudi, M., Teimoori, T., & Kozani, H. (2015). Presenting displacement-based nonlinear static analysis method to calculate structural response against progressive collapse. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4A), 478-485.
- Mashhadiali, N., Kheyroddin, A., & Zahiri-Hashemi, R. (2016). Dynamic Increase Factor for Investigation of Progressive Collapse Potential in Tall Tube-Type

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6).
 UFC 4-023-03 (2016). Design of buildings to resist progressive collapse.
 Zhu, Y., Chen, Ch., Yao, Y., Keer, L. M., & Huang, Y. (2018). Dynamic increase factor for progressive collapse analysis of semi-rigid steel frames. *Steel and Composite Structures*, 28(2), 209-221.
 Айзенберг, Я. М. (1976). *Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов*. Москва: Стройиздат.
 Аугусти, Г., Баратта, А., & Кашиати, Ф. (1988). *Вероятностные методы в строительном проектировании*. Москва: Стройиздат.
 Гуслиста, Г. Е., Кожанов, Ю. О., & Ярошенко, Д. С. (2019). *Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи (тема «Розрахунок простої рами на стійкість до прогресуючого обвалення»)*. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА.
 ДБН В.1.2-14:2018 (2018). Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.
 ДБН В.2.2-41:2019 (2019). Висотні будівлі. Основні положення.
 Дробот, Д. Ю. (2020а). *Возможные технологии расчета на прогрессирующее обрушение: учебное пособие*. Москва. URL: https://ridero.ru/books/vozmozhnye_tekhnologii_rascheta_na_progressiruyushee_obrushenie/
 Дробот, Д. Ю. (2020б). *Прогрессирующее обрушение и живучесть конструкций: Блог о вопросах прогрессирующего обрушения и живучести конструкций*. URL: <https://dwg.ru/b/d1985>
 Жмудь, В. А., Кузнецов, К. А., Кондратьев, Н. О., Трубин, В. Г., & Трубин, М. В. (2018). Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике. *Автоматика и программная инженерия*, 3 (25), 9-22.
 Капля, В. И., Савицкий, И. В., & Мاستиков, Д. А. (2018). Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений с различной ориентацией. *Инженерный вестник Дона*, 2.
 Карвинен, Т., Карвинен, К., & Валтокари, В. (2015). *Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi*. Москва: ООО «И.Д. Вильямс».
 Кулябко, В. В., & Ярошенко, Д. С. (2012). Особенности собственных колебаний регулярных рамных строительных конструкций на примере одноэтажных многопролетных рам. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2, 22-30.
 Монк, С. (2017). *Программируем Arduino: профессиональная работа со скетчами*. Санкт-Петербург: Питер.
 Редченко, В. П. (2013). Экспериментальне визначення постійних напружень в залізобетонних конструкціях. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 82-88.
 Редченко, В. П. (2014). Аналіз результатів динамічних випробувань мостів з використанням програми «СпектрУМ». *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 6, 119-125.
 Руденко, Д. В., & Руденко, В. В. (2009). Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. *Инженерно-строительный журнал*, 3, 38-41.

А. Э. ГУСЛИСТАЯ^{1*}, Д. С. ЯРОШЕНКО²,

^{1*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 44 17, эл. почта GuslystaAnna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 16 56, эл. почта yaroshenko.denis.1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2494-6082

ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Цель. Проанализировать существующие нормативные и научные публикации, содержащие положения расчетов на аварийные нагрузки, связанные с устойчивостью к прогрессирующему обрушению строительных конструкций, а также данные о динамическом влиянии на строительную конструкцию локального структурного повреждения ее элемента (отказа). Исследовать динамическое влияние на строительную конструкцию локального структурного повреждения ее элемента путем лабораторного эксперимента и численного моделирования. **Методика.** Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих нормативных документов разных стран и научных публикаций по расчету и проектированию зданий и сооружений, устойчивых к прогрессирующему обрушению. Был создан лабораторный стенд и проведены экспериментальные и численные исследования динамического поведения строительной конструкции.

© Г. Е. Гуслиста, Д. С. Ярошенко, 2020

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

торный стенд был реализован в виде статически неопределимой системы, так, чтобы локальный отказ части конструкции не приводил к разрушению всей структуры, а только к качественному изменению ее конфигурации. **Результаты.** Во время лабораторного эксперимента регистрировались виброускорения и виброперемещения характерной точки конструкции. Путем обработки виброграмм были получены значения частот и логарифмических декрементов свободных затухающих колебаний экспериментального стенда, а также значения динамического коэффициента при различных уровнях нагрузок и видах отказов. Экспериментальные данные проверялись также числовым моделированием. **Научная новизна.** Проведенные исследования позволяют оценить динамическое влияние на конструкцию локальных структурных повреждений двух видов. Было выявлено, что даже при сопоставимых значениях динамических коэффициентов при различных видах отказов величины динамических перемещений и ускорений могут отличаться в несколько раз. **Практическая значимость.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случаях полных отказов элементов конструкций они получают большие значения динамических коэффициентов (напряжений и ускорений), чем конструкции, у которых отказы дополнительных элементов сопровождаются частичным сохранением их работоспособности. В таком случае в практических инженерных расчетах можно ограничиться рассмотрением именно таких полных отказов критических элементов конструкций, а возможность их неполного выключения из работы может быть отнесено в запас несущей способности.

Ключевые слова: локальное повреждение; динамический коэффициент; лабораторный эксперимент; логарифмический декремент колебаний; виброускорение; виброперемещение

A. E. GUSLYSTA^{1*}, D. S. YAROSHENKO²

^{1*} Department of Reinforced concrete and Masonry Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-A, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 44 17, e-mail GuslystaAnna@3g.ua, ORCID 0000-0002-4486-0630

² Department of Metallic, Wooden and Plastic Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-A, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 16 56, e-mail YaroshenkoDenis@i.ua, ORCID 0000-0002-2494-6082

DYNAMIC EFFECTS BY THE STRUCTURAL DAMAGE OF THE BUILDING STRUCTURE

Purpose. To review the standards and the scientific literature on emergency load calculations that are linked with stability to progressive collapse of building structures and dynamic influence of localized structural component damage (failure) on the building structure. To study the dynamic influence on the building structure of its localized structural component damage by laboratory experiment and numerical simulation. **Methodology.** To reach the goal the existing standards and the scientific literature of different countries on calculations and design of resistant to progressive collapse buildings and structures were reviewed. The laboratory bench was created. Experimental and numerical studies were conducted by modelling dynamic behaviour of the building structure. The laboratory bench was statically indeterminate system in order to localized structural component damage (failure) did not lead to the hole structure destruction but only to its qualitative reconfiguration. **Findings.** During the laboratory experiment the vibrational accelerations and displacements for characteristic point of structure were registered. By processing vibrational diagrams, the values of the frequencies and the laboratory bench free vibrations logarithmic decrements were received, as well as the value of the dynamic increase factor by different load levels and different failure types. Experimental results were checked by numerical simulation. **Originality.** The studies allow to evaluate dynamic effect of localized structural component damage two types. It was also discovered that the values of dynamic displacements and accelerations may be different by several times by the comparable values of the dynamic increase factors of different failure types. **Practical value.** The results suggest that in the case of total structural component failure the value of dynamic increase factor (stresses and accelerations) is more than that in the case of structural component damages while retaining partial functionality. In such a case when carrying out practical engineering calculations it would be sufficient to consider the total structural component failure while the possibility of partial damages would be as reserve of power.

Keywords: localized damage; dynamic increase factor; laboratory experiment; vibrational logarithmic decrements; vibrational accelerations and displacements

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

REFERENCES

- GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance* (2016). (in English)
- Kong, D.-Y., Yang, Y., Yang, B., & Zhou, X.-H. (2020). Experimental Study on Progressive Collapse of 3D Steel Frames under Concentrated and Uniformly Distributed Loading Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 146(4). (in English)
- Mahmoudi, M., Teimoori, T., & Kozani, H. (2015). Presenting displacement-based nonlinear static analysis method to calculate structural response against progressive collapse. *International Journal of Civil Engineering*, 13(4A), 478-485. (in English)
- Mashhadiali, N., Kheyroddin, A., & Zahiri-Hashemi, R. (2016). Dynamic Increase Factor for Investigation of Progressive Collapse Potential in Tall Tube-Type Buildings. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6). (in English)
- UFC 4-023-03* (2016). Design of buildings to resist progressive collapse. (in English)
- Zhu, Y., Chen, Ch., Yao, Y., Keer, L. M., & Huang, Y. (2018). Dynamic increase factor for progressive collapse analysis of semi-rigid steel frames. *Steel and Composite Structures*, 28(2), 209-221. (in English)
- Ayzenberg, Ya. M. (1976). *Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazyami dlya seysmicheskikh rayonov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Augusti, G., Baratta, A., & Kashiati, F. (1988). *Veroyatnostnye metody v stroitelnom proektirovanii*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Huslysta, H. E., Kozhanov, Yu. O., & Yaroshenko, D. S. (2019). *Metodychni vказivky do vykonannya kvalifikatsiinoi roboty (tema «Rozrakhunok prostorovoi ramy na stiikist do prohresuiuchoho obvalennia»)*. Dnipro: DVNZ PDABA. (in Ukrainian)
- DBN V.1.2-14:2018 (2018). *Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud*. (in Ukrainian)
- DBN V.2.2-41:2019 (2019). *Vysotni budivli. Osnovni polozhennia*. (in Ukrainian)
- Drobot, D. Yu. (2020a). *Vozmozhnye tekhnologii rascheta na progressiruyushchee obrushenie: uchebnoe posobie*. Moskva. URL: https://ridero.ru/books/vozmozhnye_tekhnologii_rascheta_na_progressiruyushee_obrushenie/ (in Russian)
- Drobot, D. Yu. (2020b). *Progressiruyushchee obrushenie i zhivuchest konstruktivnykh: Blog o voprosakh progressiruyushchego obrusheniya i zhivuchesti konstruktivnykh*. URL: <https://dwg.ru/b/d1985> (in Russian)
- Zhmud, V. A., Kuznetsov, K. A., Kondratev, N. O., Trubin, V. G., & Trubin, M. V. (2018). Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkluchenie na STM32 i issledovanie pokazaniy v statike. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 3 (25), 9-22. (in Russian)
- Kaplya, V. I., Savitskiy, I. V., & Mastikov, D. A. (2018). Kalibrovka trekhosnogo akselerometra po dannym ryada izmereniy s razlichnoy orientatsiyei. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2. (in Russian)
- Karvinen, T., Karvinen, K., & Valtokari, V. (2015). *Delaem sensory: proekty sensorykh ustroystv na baze Arduino i Raspberry Pi*. Moskva: OOO «I.D. Vilyams». (in Russian)
- Kulyabko, V. V., & Yaroshenko, D. S. (2012). Osobennosti sobstvennykh kolebaniy regulyarnykh ramnykh stroitelnykh konstruktivnykh na primere odnoetazhnykh mnogoproletnykh ram. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2, 22-30. (in Russian)
- Monk, S. (2017). *Programmiruem Arduino: professionalnaya rabota so sketchami*. Sankt-Peterburg: Piter. (in Russian)
- Redchenko, V. P. (2013). Eksperymentalne vyznachennia postiinykh napruzhen v zalizobetonnykh konstruktivnykh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 82-88. (in Ukrainian)
- Redchenko, V. P. (2014). Analiz rezultativ dynamichnykh vyprobuvan mostiv z vykorystanniam prohramy «SpektrUM». *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 6, 119-125. (in Ukrainian)
- Rudenko, D. V., & Rudenko, V. V. (2009). Zashchita karkasnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*, 3, 38-41. (in Russian)

Надійшла до редколегії 30.09.2020.

Прийнята до друку 23.10.2020.