

Дослідження дії багатоповторного навантаження на ширину розкриття похилих тріщин залізобетонних згинальних елементів конструкцій будівель та споруд військового призначення

A study of the action of many repeated loads on the opening width of inclined cracks reinforced concrete flexural elements of constructions and buildings of military assignment

Галина Кушнарєва^A

Corresponding author: к.тех.н., доцент, професор кафедри забезпечення військ (сил), e-mail: sopromat.galina@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2631-2435

Руслан Булгаков^A

к.тех.н., доцент, начальник кафедри забезпечення військ (сил), e-mail: od_va_kaf_rao@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8825-718X

Віктор Прогульний^A

д.тех.н., професор, професор кафедри забезпечення військ (сил), e-mail: varkadia@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8310-3823

Тетяна Рабоча^A

к.тех.н., доцент, доцент кафедри забезпечення військ (сил), e-mail: 888tanyava8@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9475-334X

Ірина Радченко^A

викладач кафедри інженерної механіки, e-mail: irarad27@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6069-1382

Galina Kushnareva^A

Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of troops (forces) support, e-mail: sopromat.galina@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2631-2435

Ruslan Bulhakov^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief of Department of troops (forces) support, e-mail: od_va_kaf_rao@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8825-718X

Victor Progulny^A

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department, e-mail: varkadia@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8310-3823

Tatiana Rabochaya^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, e-mail: 888tanyava8@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9475-334X

Iryna Radchenko^A

Lecturer of the Department of Engineering Mechanics, e-mail: irarad27@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6069-1382

^A Військова академія, м. Одеса, Україна

^A Military Academy, Odesa, Ukraine

Received: August 5, 2024 | Revised: August 19, 2024 | Accepted: August 31, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.4.8

Мета роботи: Вивчення дії багатоповторного навантаження на ширину похилих тріщин згинальних елементів, які виконані із бетонів на карбонатному піску.

Метод: теоретично-експериментальний метод.

Результати дослідження В результаті експерименту одержані статистичні моделі, які дозволяють оцінити вплив кожного незалежного параметру та одержати інформацію про характер поліномів дослідженого явища. Для вирішення задач при оцінюванні напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій споруд, доцільно використовувати математичне моделювання, яке дає чітку оцінку кількісного впливу окремих факторів та їх взаємодію.

Теоретична цінність дослідження: Забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності залізобетонних конструкцій по похилим перерізам можна добитися, вивчаючи та досліджуючи тріщиностійкість приопорної зони балок в залежності від варіюваних факторів.

Практична цінність дослідження: При експлуатації елементи залізобетонних конструкцій військового призначення зазнають дії багатоповторних навантажень, які були розраховані на статичне навантаження. До таких конструкцій відносяться: естакади, на яких ремонтують військову техніку; мости на танкодромах; дорожні плити, по яких проходять танки та колісна військова техніка;

Purpose: Study of the action of many cyclic loads on the width of inclined cracks of flexural elements, which are made of concrete on carbonate sand.

Method: the methods of theoretical-experimental.

Findings: As a result of the experiment, statistical models were obtained that allow us to evaluate the influence of each independent parameter and obtain information about the nature of the polynomials of the investigated phenomenon. To solve the problems of assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures of buildings, it is advisable to use mathematical modeling, which gives a clear assessment of the quantitative influence of individual factors and their interaction.

Theoretical implications: Ensuring the durability and operational reliability of reinforced concrete structures on inclined sections can be achieved by studying and researching the crack resistance of the support zone of the beams depending on various factors.

Practical implications: During operation, elements of reinforced concrete structures of military purpose are subjected to many repeated loads, which were calculated for static load. Such structures include: overpasses, on which military equipment is repaired; bridges on tank tracks; road slabs on which tanks and wheeled military equipment pass; crane beams in boxes where military equipment is repaired; slabs

підкранові балки в боксах, де ремонтують військову техніку; плити колекторів, стояки вітрогенераторів, будівлі військового призначення, тощо. Розрахунок на дію поперечних сил та згинальних моментів при проектуванні залізобетонних конструкцій є одним з основних.

Цінність дослідження: У статті розглянуті експериментальні дані по дослідженню роботи залізобетонних конструкцій при дії багатоповторних навантажень. В перерізах конструкцій, крім нормальних, виникають також похилі тріщини, які приводять до втомного руйнування, а потреба в залізобетонних конструкціях, які включають різні види бетону та арматури, дуже необхідна.

Майбутні дослідження: У зв'язку з тим, що циклові навантаження виникають часто і діють на елементи залізобетонних конструкцій – вплив їх на механічні та деформативні параметри потребує досконального вивчення.

Тип статті: Теоретично-експериментальний.

of collectors, risers of wind generators, military buildings, etc. Calculation of transverse forces and bending moments in the design of reinforced concrete structures is one of the main ones.

Value: The article examines experimental data on the study of the operation of reinforced concrete structures under the action of many repeated loads. In cross-sections of structures, in addition to normal ones, there are also inclined cracks that lead to fatigue failure, and the need for reinforced concrete structures that include various types of concrete and reinforcement is very necessary.

Future research: Due to the fact that cyclic loads occur frequently and act on elements of reinforced concrete structures, their influence on mechanical and deformation parameters requires a thorough study.

Papertype: Theoretical–experimental.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, будівлі та споруди, військове містечко, військове призначення, деформативність, міцність, багатоповторні навантаження, несуча здатність, похилі тріщини, ширина розкриття тріщини, прольоти, зріз.

Key words: reinforced concrete structures, buildings and structures, military small town, military assignment, deformability, strength, many repeated loads, bearing capacity, inclined cracks, crack opening width, spans, section.

Вступ

Композитні будівельні конструкції можна розглядати як спеціально організовані композитні матеріали. Це дозволяє представити композитні будівельні матеріали та конструкції як складні системи, які відповідають загальним вимогам: складаються із підсистем, підсистеми складають деяку цілісність, між деякими елементами і підсистемами існує взаємозв'язок, виділена система являється під системою великої системи. Характерними структурними елементами на всіх рівнях структур їх неоднорідностей можна вважати тріщини. Вони визначають розподіл деформацій і напружень в матеріалі та конструкції.

Розвиток мікротріщин у конструкції зв'язано з характером утворення тріщин матеріалу. Так як тріщини проходять певні етапи розвитку (від зародження, укрупнення до необоротності росту магістральної тріщини), то можна припустити, що всі рівні структурних неоднорідностей беруть участь в руйнуванні матеріалу і конструкції. При цьому ініціатором зародження тріщин можуть виступати як структурні неоднорідності любого масштабного рівня, так і деформацій, напружень, зв'язаних з особливостями роботи конструкції.

При появі в конструкції тріщин можна виділити два підходи для оцінки її несучої здатності. Традиційний підхід припускає фіксацію появи тріщин, визначення їх розмірів і внесення корективів у внутрішньому напруженому стані. Другий підхід припускає використання положення механіки руйнування. Задача зводиться до вивчення умов розвитку тріщини в гетерогенному матеріалі конструкції. При цьому основну увагу необхідно приділяти концентрації напружень у гирла магістральної тріщини.

В багатьох реальних інженерних конструкціях військового призначення спостерігається руйнування після невеликого числа циклів навантаження, які числяться декількома тисячами повторень. Руйнування після малого числа циклів навантаження від так званої мало циклової втоми, звичайно відбувається при значній (біля 1 %) пластичної деформації в макрооб'ємах елемента залізобетонної конструкції що розглядаємо. Розрахунки елементів конструкцій на багатоциклову втому базуються на експериментальних даних вивчення закономірностей деформування та руйнування при циклічному крихкому деформуванні, а також вивчення кінетичного неоднорідного напружено-деформованого стану і накопичення пошкоджень в зонах концентрації в місцях імовірного руйнування.

Теоретичні основи дослідження

Впливу циклічних навантажень на залізобетонні елементи, що згинаються, приділяли увагу: Мельник С.В., Карпюк В.М., Валовой М.О., Мірсаяпов І.Т., Маїлянц Л.Р., Корнійчук О.І. Вивчали напружено-деформований стан згинаних залізобетонних елементів при дії багато циклових навантажень: Коссовський Г.Д., Левчич В.В., Мельник І.В., Кваша В.Г., Кінаш Р.І. та інш.

Всі вчені, які досліджували залізобетонні конструкції, відмічали негативний вплив циклічних навантажень на процеси утворення тріщин та розвиток похилих тріщин. Порівнюючи ширину похилої тріщини при одноразовому навантаженні з повторним, вчені відмітили, що вона збільшується на 12-15%.

Досліджуючи прогінні залізобетонні балки мало цикловим знакозмінним навантаженням (Карпюк, Албу, Даниленко, Сьоміна, 2014) встановили, що мало циклове знакозмінне навантаження, особливо високих рівнів, не тільки зменшує несучу здатність дослідних зразків на 20% та їхню тріщиностійкість, а і суттєво збільшує ширину розкриття нормальних, а особливо похилих тріщин та величину прогинів на 35%, та змінює характер їхнього руйнування, порівняно з одноразовим пропорційно зростаючим навантаженням, при якому процес утворення і розвитку тріщин пов'язаний зі зміною їхнього напружено-деформованого стану. Ці відмінності зумовлені, насамперед, отриманими пошкодженнями балок, а також їхньої жорсткості.

На основі аналізу експериментальних досліджень (Масюк, Корнійчук, Алексієвets, 2009) визначили характер утворення та розкриття тріщин в згинальних елементах в зонах сумісної дії згинальних моментів і поперечних сил за дії мало циклових знакозмінних навантажень при різних прольотах «зрізу» та рівнях навантажень з використанням розрахункової моделі опору залізобетону. Після суттєвого збільшення зовнішнього навантаження $f = 0.45$ руйнуючого, утворились ближче до опори похилі тріщини. З'явилися вони приблизно посередині висоти перерізу балки. Після появи цих тріщин процес розвитку тріщин призупинився, особливо це помітно в балках з невеликим прольотом зрізу. Характер і черговість утворення тріщин в зразках залежить від прольоту зрізу. Із збільшенням прольоту зрізу нормальні тріщини утворювались при менших значеннях навантаження, а похилі – навпаки.

Розглядаючи роботу залізобетонних балок, підсиленних під навантаженням одночасно в стиснутій і розтягнутій зоні при дії мало циклових навантажень встановлено, що підсилення підвищує несучу здатність балок, але збільшує ширину розкриття похилих тріщин (Ворусьюком, Зьютіук, 2020).

Проаналізувавши дані впливу пошкоджень та прогону зрізу на залишкову несучу здатність, прогини, характер утворення тріщин, граничну ширину розкриття тріщин, напружено-деформований стан бетону та стрижнів поперечної арматури було встановлено, що несуча здатність зменшується при збільшенні площі пошкоджень та прогону зрізу. В межах кожного прогону зрізу зразки з більшою площею пошкодження витримували меншу поперечну силу, більше навантаження, здатні були прийняти зразки з меншою висотою пошкодження і більшим кутом нахилу пошкодження (Polyansky, 2020).

Опираючись на дані експериментальних досліджень (Даниленко, 2020), виявив механізми деформування і руйнування, а також результати моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених балок і елементів обойми підсилення, запропонував розрахункову модель несучої здатності приопорних ділянок і сумісної роботи вказаних балок з попередньо напруженими металевими обоймами.

Досліджуючи міцність, тріщиностійкість, деформативність та витривалість залізобетонних попередньо напружених балок із канатною арматурою європейського типу при дії одноразових, мало циклових та багато циклових навантажень (Kovalchik, 2015) виконав

статичні та динамічні випробування монолітної попередньо напруженої прогонової будови естакади та отримав дані про вплив термонапруженого стану при влаштуванні таких. Базою випробувань при багато циклових випробуваннях було прийнято $N = 2 \cdot 10^6$ циклів. Випробовувались 3 серії дослідних зразків по 2 балки-близнюки з різними характеристиками навантаження на гідравлічному пульсаторі EUS. Були розроблені нові залізобетонні балки із прогонами 15, 18, 21, 24 та 33 м, які розраховані на сучасні навантаження відповідно до вимог норм прогонових будов мостів на їх тріщиностійкість.

Постановка проблеми

Сьогодні залізобетон залишається основним будівельним матеріалом і тому розвиток теорії та удосконалення методів розрахунку залізобетонних конструкцій входить в число важливих задач капітального будівництва військового призначення. Залізобетон відноситься до матеріалів, в яких при опорі силовим та деформаційним діям з'являються тріщини. Вивчення процесу утворення тріщин і роботи розтягнутого бетону між тріщинами в елементах залізобетонних конструкцій потребує притягнення ряду гіпотез і спільної роботи двох матеріалів.

Відсутність теоретичного обґрунтування і аналізу експериментальних даних, раніше віддавали перевагу емпіричним методам розрахунку, в тому числі і по ширині розкриття тріщин. Практика проектування і експерименти застосування залізобетонних конструкцій говорять, що нерідкі випадки, коли клас бетону, розміри перерізів і площа розтягнутої арматури по умовам розкриття тріщини приходиться приймати більше, ніж потрібно по міцності.

Все більше уваги для удосконалення розрахунку залізобетонних конструкцій необхідно приділяти методам механіки руйнування, так як після появи тріщини гіпотези і методи механіки, суцільне середовище уже не використовують. Питання, які зв'язані з дослідженням напружено-деформованого стану в околі тріщини, найбільш повно вивчені в механіці руйнування. Найбільш зв'язані з цим ефекти потребують вивчення їх фізичної суті, і в першу чергу ефект, зв'язаний з порушенням суцільності залізобетону.

Для балок із поперечною арматурою питання розрахунку згинальних елементів конструкцій входять до числа важливих по виникненню тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента, при дії багато повторного навантаження достатньо складний і важливий. По величині похилої тріщини оцінюється безпека залізобетонних балок. При експлуатації елементи залізобетонних конструкцій військового призначення зазнають дії багато повторних навантажень, які були розраховані на статичне навантаження. До таких конструкцій відносяться: естакади, на яких ремонтують військову техніку; мости на танкодромах; дорожні плити, по яких проходять танки та колісна військова техніка; підкранові балки в боксах, де ремонтують військову техніку; плити колекторів, стояки вітрогенераторів, будівлі військового призначення при аварійних ситуаціях тощо.

Розрахунок на дію поперечних сил та згинальних моментів при проектуванні залізобетонних конструкцій може бути одним із основних. При розрахунку міцності та тріщиностійкості конструкцій, норми проектування, не враховують численні фактори, які впливають на характер напружено-деформованого стану елементів похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, процеси та передісторію тріщиноутворення при дії багато циклічних навантажень. Для цього необхідно експериментально встановити вплив таких факторів, як величину прольоту зрізу, міцності бетону, коефіцієнтів поздовжнього армування та асиметрії циклу на міцність та тріщиностійкість, утворення та зміну ширини розкриття похилих тріщин згинальних залізобетонних елементів при дії багато повторного навантаження для будинків та споруд військового містечка.

Методологія дослідження.

Методики розрахунків на міцність та тріщиностійкість похилих перерізів за діючими нормативними документами не враховують вплив багато повторних навантажень на зміну фізико-механічних властивостей бетонів та напружено-деформованого стану похилих перерізів, оскільки дане питання вивчено недостатньо.

Кушнарєва Г.О. досліджувала вплив багато повторних навантажень на ширину розкриття похилих тріщин в згинальних елементах при зміні їх параметрів. Виявлено, що інтенсивність та ширина розкриття похилих тріщин залежать від величини прольоту зрізу, коефіцієнту асиметрії циклу і кількості циклів повторного навантаження.

Задача дослідження є одержання моделей, що відображали б роботу приопорної зони, виникнення та розвитку похилих тріщин при багатоциклового навантаженні та перед руйнуванням. Згідно з прийнятою методологією натурний експеримент виконується за чотирьох факторним, трирівневим планом Бокса-Бенкіна. Найбільш впливовим фактором є величина відносного прольоту зрізу (a/h_0), яка змінювалась на трьох рівнях: $X_1 \rightarrow 1,14 a/h_0$; $2,0 a/h_0$; та $2,86 a/h_0$. Другим за величиною впливу є такий конструктивний чинник як коефіцієнт поздовжнього армування (U_s): $X_2 \rightarrow 0,013$; $0,018$; $0,023$. Третім міцність бетону (f_{cd}): $X_3 \rightarrow 17$ МПа; 21 МПа; 25 МПа. В якості четвертого прийнято коефіцієнт асиметрії циклу (ρ_a) фактор: $X_4 \rightarrow 0,25$; $0,33$; $0,41$. Вік балок на гранітному щебені та вапняковому піску – 9-12 місяців.

Дослідження проводили на універсальному гідравлічному пресі ГРМ – 2А з пульсатором. Частота прикладення 335 циклів в хвилину. Експериментальні балки досліджували як однопрольотні, вільно обперті, навантажені двома зосередженими силами з розрахунковим прольотом 1200 мм.

Визначаючи статичне руйнуюче навантаження та момент утворення тріщин, балки ступенями навантажували статично до верхньої межі повторного навантаження. Потім балки піддавали багато повторному навантаженню з рівнем від 0,3 до 0,78 статичного руйнуючого зусилля. Під час зупинок, вимірювали деформації бетону та арматури, фіксували тріщини, які виникали.

Випробування дослідних зразків здійснювали за схемою однопрогінної вільно обпертої балки, завантаженої зверху двома зосередженими силами. Спочатку випробували 25 дослідних балок (зразків-близнюків) першої серії на дію одноразового короточасного ступеневого навантаження до руйнівного стану, коли ширина розкриття похилих тріщин і стріла прогинів перевищувала допустимі значення. Далі випробували на дію багато повторного поперечного навантаження. При досягненні граничних значень деформацій в бетоні або арматурі, надмірне розкриття (до 1 мм) похилих (частіше) або нормальних (рідше) тріщин, суттєве збільшення (до 15 мм) стріли прогинів проходило руйнування за похилою тріщиною.

Результати

Найбільший приріст деформацій у бетоні та поздовжній арматурі спостерігалось на перших 300-500 циклах і, як правило, вони стабілізувалися при рівнях навантаження $\eta = \pm 0,5 \dots \pm 0,65$. Під час випробувань дослідних зразків-балок на дію короточасного одноразового та циклічного навантаження, слідкували за утворенням та шириною розкриття тріщин на їх поверхні. Ширину розкриття нормальних тріщин визначали на рівні розтягнутої робочої арматури, а в зоні поперечної сили та згинального моменту – посередині висоти балки в місцях, де візуально вона виявлялася найбільшою. При втомних випробуваннях деяких балок відзначалась низька міцність бетону розтягнутої зони, тріщини в яких з'являлися при напруженнях, менших міцності бетону на осьовий розтяг, тобто до прикладення повторного навантаження. Якщо

максимальне навантаження нижче навантаження утворення тріщин, то із зростанням числа циклів кількість тріщин збільшувалася, а ширина кожної тріщини зростала.

Якщо експериментальні балки випробовувались при навантаженнях, які перевищували навантаження утворення тріщин, то ширина похилих тріщин до кінця першого статичного навантаження не перевищувала 0,05 мм.

При повторних навантаженнях першими утворювалися нормальні тріщини в зоні чистого згину та під зосередженими силами на рівнях навантаження $\eta=0,15\dots0,25$ від руйнівного. При збільшенні навантаження ці тріщини розвивалися у сторону стиснутої зони, при цьому збільшувалася ширина їх розкриття та утворювалися нові у зоні сумісної дії згинального моменту і поперечної сили, поступово нахилившись до місця прикладення сили. Перші похилі тріщини з'явилися вже при 300-600 циклах прикладення навантаження. Багато повторне навантаження приводить до непереривного збільшення похилих тріщин. При подальшому прикладенні циклового навантаження розвиток більшості похилих тріщин після деякого числа циклів припиняється, за винятком 2-3 тріщин, які продовжували розвиватися.

Умови, при яких виникали похилі тріщини, залежали від величини прольоту зрізу та рівня навантаження. При величині прольоту зрізу $2,0 a/h_0$ перші похилі тріщини з'явилися в обох напрямках вже при 300 циклах повторного навантаження і в нижній зоні у опори вони пересікли поздовжню арматуру на деякій відстані від опори. Для цих балок, в основному, виникали дві похилі тріщини. Перша з'явилася в нижній частині балки і розвивалася із нормальної тріщини, викривляючись по напрямку до місця прикладення сили. Вона не являлась небезпечною. Критична похила тріщина виникла в середній частині балки. Потім відбувався її розвиток в верхній та нижній гранях балки. Висота стиснутої зони в межах 7,5-2,4 см. Поява критичної похилої тріщини залежала від коефіцієнта поздовжнього армування і коефіцієнта асиметрії циклу повторного навантаження. Так, для балок з $U_s=2,3\%$, $\rho_a=0,41$ небезпечна похила тріщина виникла при $N=2\cdot 10^4$ циклів прикладання навантаження (Б-2А-21); при $U_s=2,3\%$, $\rho_a=0,33$ (Б-2А-9), рівень навантаження дорівнював 0,38 статичного руйнуючого зусилля при $N=6\cdot 10^4$ циклів.

Для балок з малим процентом армування $\mu_s=1.3\%$, $\rho_a=0,41$ небезпечна похила тріщин з'явилася при $N=10^3$ циклів повторного навантаження. Для балки Б-2А-21 перед прикладанням повторного навантаження до рівня максимальної сили циклу ($\gamma=0,42$, $\rho_a=0,41$, $U_s=2,3\%$) виникали тільки миттєві тріщини. Нормальні тріщини з'являлися при 200-800 циклах на відстані 0,1-0,15 прольоту зрізу і в зоні чистого згину.

Перша похила тріщина виникла при 300 циклах повторного навантаження на відстані 0,7 прольоту зрізу від місця прикладення сили в нижній грані балки. В процесі подальшої дії пульсуючого навантаження критична похила тріщина одержала подальший розвиток і при 1200 циклах вона досягла місця прикладення сили і розвивалася в нижній грані балки ($N=2\cdot 10^4$). Балка зруйнувалася при $2,2\cdot 10^4$ циклах. Рівень навантаження балки був вище межі витривалості, тому руйнування проходило при $N=2\cdot 10^6$ циклів багато повторного навантаження. У решти балок з прольотом зрізу $2,0\cdot h_0$ рівень навантаження складав 0,4-0,6 статичного руйнуючого зусилля. Чим вище рівень навантаження, тим більше можливість появи похилих та нормальних тріщин при першому статичному навантаженні.

При прольоті зрізу $2,86\cdot h_0$ похилі тріщини з'явилися в нижній частині балки при 300-600 циклах в обох напрямках і швидко розвивалися. Нижній кінець похилої тріщини пересік поздовжню арматуру на деякій відстані від опори. Висота стиснутої зони перед руйнуванням складала 5,4-4,5 см. Після появи критичної похилої тріщини балки руйнувалися внаслідок втомного розриву поперечних стержнів з подальшим роздробленням бетону стиснутої зони над похилою тріщиною.

В балці Б-3Б-1 перші похилі тріщини виникли при 300-400 циклах повторного навантаження ($\eta=0,15$). Критична похила тріщина виникла при 1100 циклах на відстані 0,4-0,6

прольоту зрізу від сили. При 1900 циклах критична похила тріщина досягла місця прикладення сили. Балка зруйнувалась при $N=3 \cdot 10^3$ циклах навантаження. Максимальне розкриття похилої тріщини спостерігалось в 10 см від нижньої межі балки. Після виникнення критичної похилої тріщини решта тріщин закрилися, або ширина розкриття їх стабілізувалася.

Для балок з невеликим прольотом зрізу $\alpha=1,14 h_0$ перша похила тріщина з'явилася біля опори при 800-900 циклах навантаження, потім швидко розвивалася, поширювалася до місця прикладення сили, після чого розвиток похилої тріщини припинявся. При утворенні нових похилих тріщин відмічався вплив процента поздовжнього армування. Так, для балок з $U_s=2,3\%$ повторні, більш похилі тріщини, з'явилися до моменту руйнування (50-60 тисяч циклів навантаження).

При дослідженні втомного навантаження похилих тріщин при $N=2 \cdot 10^6$ циклів повторного навантаження встановлено характер утворення тріщин в зоні спільної дії згинального моменту та поперечної сили, його залежність від величини прольоту зрізу. Найбільш низький рівень утворення тріщин виявлено у балок з $1,14 h_0$; $U_s=2,3\%$; $\rho_a=0,41$. Пульсуюче навантаження визиває значне збільшення ширини розкриття тріщин. При характеристиках асиметрії циклу $\rho_a=0,25$ ширина розкриття похилих тріщин зростає з 0,05-0,15 до 0,2-0,3 мм та з 0,3-0,35 до 0,5-0,6 мм.

Рівень навантаження в експериментах на ширину розкриття похилих тріщин виявляє невеликий вплив. Помітний вплив на ріст ширини розкриття похилих тріщин має коефіцієнт асиметрії циклу повторного навантаження. Чим нижче ρ_a , тим інтенсивніше росте ширина похилої тріщини. При збільшенні ρ_a збільшується число циклів навантаження, так як в цьому випадку внаслідок менш інтенсивного росту тріщин, пізніше досягається висота стиснутої зони.

В процесі експерименту встановлено, що із збільшенням інтенсивності поперечного армування, зменшується величина розкриття похилих тріщин. Із збільшенням довжини прольоту зрізу, ширина розкриття тріщин і інтенсивність збільшується. Різкий приріст похилих тріщин у балок (Б-2А-27; Б-2А-9; Б-2А-13) після прикладення $1 \cdot 10^4$ циклів навантаження свідчить, що похилий переріз близький до руйнування. В основному, збільшення ширини розкриття похилої тріщини спостерігалася у балок, в яких пройшов повторний розрив одного із стержнів поперечної арматури. Ширина розкриття тріщин досягла 1,0-1,5 мм.

При збільшенні внутрішніх зусиль утворювались нові тріщини, довжина і ширина розкриття існуючих тріщин, похилі тріщини зливалися в одну критичну, руйнування проходило із розривом стержнів поперечної арматури з наступним зрізом або роздробленням стиснутої зони бетону. При появі нових похилих та нормальних тріщин, збільшувалася ширина розкриття похилої тріщини.

При дослідженні впливу величини прольоту зрізу, міцності бетону, коефіцієнта поздовжнього армування та коефіцієнта асиметрії циклу на процес утворення і розвитку похилих тріщин при дії багато повторних навантажень одержали спрощені рівняння.

При $N=10^3$ циклів: $Y(a_{cr}) = 0,265 + 0,12 \cdot X_1 + 0,155 \cdot X_3^2 + 0,1 \cdot X_3 \cdot X_4$.

Перед руйнуванням: $Y(a_{cr}) = 0,396 + 0,092 \cdot X_1 + 0,191 \cdot X_3 - 0,158 \cdot X_2^2 + 0,138 \cdot X_3 \cdot X_4$.

В момент утворення тріщин визначаючими є прольот зрізу, міцність бетону та коефіцієнт асиметрії циклу. В момент, попередній руйнуванню, ширина розкриття похилої тріщини залежить ще і від насичення похилого перерізу поздовжньою робочою арматурою.

При $N=1 \cdot 10^3$ циклів, коли збільшилась кількість навантажень, ширина розкриття похилих тріщин складала 0,25 мм, а перед руйнуванням при одному і тому же прольоті зрізу, коефіцієнті поздовжнього армування, асиметрії циклу, міцності бетону, ця величина досягла 0,6 мм.

При збільшенні величини прольоту зрізу ширина та інтенсивність розкриття тріщин зростає. Ефект впливу прольоту зрізу практично в 10 разів перевищує вплив інших. Зі збільшенням міцності бетону ширина розкриття тріщин при інших рівних умовах збільшується. Ступень впливу міцності бетону на ширину розкриття тріщин істотно залежить від коефіцієнта

асиметрії циклу, зі збільшенням якого при збільшенні класу бетону, ширина похилої тріщини зростає.

Висновки

При експлуатації конструкцій і в умовах реконструкції існуючих будівель та споруд військового містечка залізобетонні елементи часто зазнають дії багато циклових навантажень. Розрахунок міцності та тріщиностійкості похилих перерізів за діючими нормативними документами не враховують вплив зазначених навантажень на зміну фізико-механічних властивостей бетонів та напружено-деформованого стану похилих перерізів, оскільки дане питання вивчено недостатньо.

У даній роботі було проведено експериментальне дослідження впливу багато повторного навантаження на міцність похилих перерізів, а також на утворення, процеси розвитку і зміни ширини розкриття похилих тріщин згинальних залізобетонних елементів. Очевидно, що основною причиною зниження несучої здатності дослідних зразків при багато повторному навантаженні є порушення структури бетону на приопорних ділянках, його розщільнення та часткова втрата зчеплення з арматурою. Найбільш істотний вплив на ширину розкриття похилої тріщини чинить величина прольоту зрізу. Зі збільшенням величини прольоту зрізу ширина і інтенсивність розкриття похилих тріщин зростає. Ефект впливу прольоту зрізу в 10 разів перевищує вплив інших факторів.

Довжина прольоту зрізу суттєво впливає на характер утворення тріщин, форму руйнування та несучу здатність експериментальних зразків. Найбільше збільшення ширини розкриття похилих тріщин за дії на балки циклічного навантаження спостерігалось для прольоту зрізу $2,86 \cdot a/h_0$. Виявлено, що циклічне навантаження, залежно від рівня навантаження та кількості циклів, зменшує поперечну силу, при якій утворюються похилі тріщини на 10-22%, а також збільшує їх кількість, довжину та ширину розкриття в 1,5-4 рази у порівнянні з одноразовим навантаженням.

В результаті експерименту одержані статистичні моделі, які дозволяють оцінити вплив кожного незалежного параметру та одержати інформацію про характер поліномів дослідженого явища. Підбиваючи підсумки слід відзначити, що для рішення задач при оцінюванні напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій будівель та споруд військових містечок, доцільно використовувати математичне моделювання, яке дає чітку оцінку кількісного впливу окремих факторів та їх взаємодію.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Карпюк В.М., Албу К.І., Даниленко Д.С., Сьоміна Ю.А. (2014). Вплив циклічного знакозмінного навантаження на міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних елементів, що згинаються. – Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, №6. С.352.
2. Борисюк О.П., Зютюк Ю.Ю. (2020). Напружено-деформований стан залізобетонних балок, підсилених під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії мало циклових навантажень. Рівне : НУВГП. С. 303-313.

3. Масюк Г.Х., Корнійчук О.І., Алексієвець І.І. (2009). Аналіз тріщиноутворення при дії знакозмінних мало циклових навантажень на основі розрахункової моделі опору залізобетону. Рівне : НУВГП. Вісник. С. 99-104.
4. Вегера П.І., Хміль Р.Є., Вашкевич Р.В., Бліхарський З.Я. (2017). Розрахунок несучої здатності похилих перерізів залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами. – Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, Вип. 34. С. 222-229.
5. Полянський К.В. (2020). Напружено-деформований стан та несуча здатність похилих перерізів пошкоджених залізобетонних балок: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. Одеса : ОДАБА. С. 192.
6. Даниленко Д.С. (2020). Несуча здатність пошкоджених силовими тріщинами балок, підсилених металевими обоймами: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. Одеса : ОДАБА. С. 204.
7. Ющук О.В. (2021). Несуча здатність, тріщиностійкість і деформативність нерозрізних залізобетонних балок за дії мало циклових повторних і знакозмінних навантажень. Рівне : НУВГП. С. 160.
8. Валовой М.О. (2011). Міцність, тріщиностійкість та деформативність підсилених згинальних елементів при повторних навантаженнях: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук, Київ. С. 25.
9. Корнійчук О.І. (2009). Міцність та тріщиностійкість похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії мало циклових знакозмінних навантажень. Полтава. С. 213-219.
10. Ковальчик Я.І. (2015). Міцність, тріщиностійкість та деформативність попередньо напружених балкових залізобетонних прогонових будов мостів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. Київ. С. 25.
11. Смолянінов М.Ю. (2007). Підвищення міцності й тріщиностійкості залізобетонних елементів, підсилених акриловим полімеррозчином, при дії короткочасних статичних і багаторазово повторних навантажень: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. Харків. с. 23.
12. ДБН В.2.6-98:2019. Бетонні та залізобетонні конструкції. [чинний від 2019-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, С. 127. (Національний стандарт України).

References

1. Karpiuk V.M., Albu K.I., Danylenko D.S., Somina Yu.A. (2014). Vplyv tsyklichnoho znakozminnoho navantazhennia na mitsnist, trishchynostiikist ta deformatyvnist zalizobetonnykh elementiv, shcho zghynaiutsia. [The effect of cyclic alternating load on the strength, crack resistance and deformability of reinforced concrete bending elements]. – Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, №6. S. 352.
2. Borysiuk O.P., Ziutiuk Yu.Iu. (2020). Napruzhenno-deformovanyi stan zalizobetonnykh balok, pidsylenykh pid navantazhenniam stalefibrobetonom i kompozytamy pry dii malo tsyklovykh navantazhen. [The stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced under load with steel-reinforced concrete and composites under the action of low cyclic loads]. Rivne : NUVHP. S. 303-313.
3. Masiuk H.Kh., Korniihuk O.I., Aleksiiievets I.I. (2009). Analiz trishchynoutvorennia pry dii znakozminnykh malo tsyklovykh navantazhen na osnovi rozrakhunkovoi modeli oporu zalizobetonu. [Analysis of crack formation under the action of sign-changing few-cycle loads based on the calculation model of reinforced concrete resistance]. Rivne : NUVHP. Visnyk. S. 99-104.

4. Vehera P.I., Khmil R.Ie., Vashkevych R.V., Blikharskyi Z.Ia. (2017). Rozrakhunok nesuchoi zdatnosti pokhylykh pereriziv zalizobetonnykh balok, pidsylenykh kompozytnymy materialamy. [Calculation of the bearing capacity of inclined sections of reinforced concrete beams reinforced with composite materials]. – Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, Vyp. 34. S. 222-229.
5. Polianskyi K.V. (2020). Napruzhenno-deformovanyi stan ta nesucha zdatnist pokhylykh pereriziv poshkodzhennykh zalizobetonnykh balok [Stress-strain state and bearing capacity of inclined sections of damaged reinforced concrete beams]: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. Odesa : ODABA. S. 192.
6. Danylenko D.S. (2020). Nesucha zdatnist poshkodzhennykh sylovymy trishchynamy balok, pidsylenykh metalevymy oboimamy [Bearing capacity of beams damaged by stress cracks reinforced with metal clips]: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. Odesa : ODABA. s. 204.
7. Yushchuk O.V. (2021). Nesucha zdatnist, trishchynostiikist i deformatyvnykh neroriznykh zalizobetonnykh balok za dii malo tsyklovykh povtornykh i znakovminnykh navantazhen. [Bearing capacity, crack resistance and deformability of uncut reinforced concrete beams under the action of low-cycle repeated and sign-changing loads]. Rivne : NUVHP. S. 160.
8. Valovoi M.O. (2011). Mitsnist, trishchynostiikist ta deformatyvnykh pidsylenykh zghynalnykh elementiv pry povtornykh navantazhenniakh [Strength, crack resistance and deformability of reinforced bending elements under repeated loads]: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk, Kyiv. S. 25.
9. Kornichuk O.I. (2009). Mitsnist ta trishchynostiikist pokhylykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pry dii malo tsyklovykh znakovminnykh navantazhen. [Strength and crack resistance of inclined cross-sections of flexural reinforced concrete elements under the action of low-cycle sign-changing loads]. Poltava. S. 213-219.
10. Kovalchuk Ya.I. (2015). Mitsnist, trishchynostiikist ta deformatyvnykh poperedno napruzhenykh balkovykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv [Strength, crack resistance and deformability of prestressed beam reinforced concrete span structures of bridges]: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. Kyiv. S. 25.
11. Smolianinov M.Iu. (2007). Pidvyshchennia mitsnosti y trishchynostiikosti zalizobetonnykh elementiv, pidsylenykh akrylovym polimerrozchynom, pry dii korotkochasnykh statychnykh i bahatorazovo povtornykh navantazhen [Increasing the strength and crack resistance of reinforced concrete elements reinforced with an acrylic polymer solution under the action of short-term static and repeatedly repeated loads]: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. Kharkiv. S. 23.
12. DBN V.2.6-98:2019. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. [Concrete and reinforced concrete structures]. [chynnyi vid 2019-06-01]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, S. 127. (Natsionalnyi standart Ukrainy).