

АНОТАЦІЯ

Глібоцький Р. В. Несуча здатність пошкоджених базальтобетонних балок, підсилених вуглепластиковим полотном.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2024.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню впливу ступенево зростаючого знакопостійного малоциклового навантаження на несучу здатність, тріщиностійкість та деформативність пошкоджених прогінних базальтопластикових елементів, підсилених вуглепластиковим полотном.

У **вступі** роботи приведене обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика та зв'язок з науковими програмами і планами.

У **першому розділі** дисертації представлений огляд стану та концепції розвитку методів підсилення та розрахунку будівельних конструкцій. Розглянуто експериментальні дослідження підсилених елементів. З наведеного огляду існуючих публікацій було зроблено висновок, що питання несучої здатності та деформативності залізобетонних елементів, підсилених композитним зовнішнім армуванням, вивчено недостатньо. Були встановлені нерозглянуті та нереалізовані питання та завдання впливу тривалого навантаження та роботи розтягнутої зони бетону, вплив історії навантаження конструкції до її підсилення, оцінки напружено-деформованого стану контактної зони «композит-бетон», експериментальних досліджень щодо впливу появи вертикальних тріщин на відшарування елементів підсилення. Положення та висновки, отримані в ході аналізу подібних експериментів, слабо застосовні для розробки теорії розрахунку елементів, що згинаються, для яких питання оцінювання зчеплення матеріалів є головним. Було

зазначено, що ряд авторів досліджень отримували різні результати, незважаючи на застосування подібних матеріалів і методик.

Запропоновані напрями подальшої розробки теми. Обґрунтовано актуальність завдання акумулювання експериментальних даних, необхідних для вдосконалення методики розрахунку підсилення бетонних елементів зовнішнім армуванням.

У *другому розділі* роботи наведені обґрунтування та передумови вибору дослідних факторів, план експериментальних досліджень та детальний опис методики проведення випробувань дослідних зразків-балок.

Для досягнення поставленої мети попередньо реалізовано дві серії лабораторних дослідів з однопрогінними балками, армованими Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP), за дії статичного малоциклового повторного навантаження високих рівнів згідно держбюджетних тем 0108U000559, 0121U114597 з використанням ротатабельного плану-експерименту Бокса-Бенкіна В₃. У цих перших двох серіях у якості дослідних обрані наступні фактори (конструктивні чинники), які змінювалися на трьох рівнях: відносний прольот зрізу, клас бетону за міцністю та коефіцієнт поперечного армування. У першій серії дослідів непошкоджені балки були випробувані на дію ступенево зростаючого одноразового статичного, а у другій – малоциклового повторного навантаження.

Пошкоджені після випробувань бетонні балки з BFRP були підсилені знизу у розтягнутій зоні на всю їхню довжину (1575 мм) і ширину ($b=100$ мм) та на приопорних ділянках у вигляді замкнутих сорочок довжиною, відповідно, 150, 300 і 450 мм вуглепластиковим полотном Sika®Wrap® - 230C, приклеєного двокомпонентною смолою Sikadur – 300 за встановленою технологією з попередньою підготовкою поверхні дослідних зразків-балок і використанням дрібнозернистих ремонтних сумішей для зароблення вибоїн, каверн і надмірно розкритих тріщин.

Після повної полімеризації двокомпонентної смоли раніше пошкоджені, а потім підсилені вуглепластиком бетонні балки з

базальтопластиковою арматурою, повторно були випробувані на дію ступенево зростаючого знакопостійного малоциклового поперечного навантаження до руйнування. Кількість повторних навантажень на даному ступеню, як правило, не перевищувала 10 і зростала до тих пір, поки не наступала стабілізація деформацій у бетоні, елементах підсилення та балках в цілому. На завершальному етапі випробувань за нестабілізованих деформацій підсиленних балок знімали з них вимірювальні прилади і доводили їх до руйнування.

Руйнування дослідних підсиленних базальтобетонних балок з великими ($a/d=3$) і середніми ($a/d=2$) прольотами зрізу відповідало напружено-деформованому стану майже збалансованого нормального поперечного перерізу, який характеризувався досягненням у зовнішньому вуглепластиковому шарі підсилення ФАП-CFRP (фібро формованого пластику) граничних деформацій і напружень розриву, а у стиснутій зоні бетону – закритичних (на низхідній ділянці діаграми « $\sigma_c - \epsilon_c$ ») деформацій і напружень. Зазначене руйнування дослідних балок з великими і середніми прольотами зрізу починалося з розриву зовнішньої арматури ФАП- CFRP вуглецевим волокном і супроводжувалося різким підвищенням напружень у розтягнутій базальтопластиковій арматурі BFRP, розтріскуванням та розшаруванням захисного шару бетону і надмірним неконтрольованим збільшенням прогинів.

Руйнування балок з малими ($a/d=1$) прольотами зрізу супроводжувалося подальшим розкриттям раніше утворених похилих тріщин і розривом замкнених вуглепластикових сорочок на бічних гранях їхніх приопорних ділянок та різким збільшенням прогинів, зумовлених, насамперед, деформаціями взаємного зсуву окремих частин дослідних зразків.

Детально розглянуто основні можливості програмного комплексу ЛІРА-САПР. Представлено перелік програм, які взаємодіють з цим комплексом. Також досліджено основні теорії та критерії міцності та стійкості, які застосовуються. У бібліотеці програмного комплексу доступний список

кінцевих елементів (КЕ), які використовуються для моделювання будівель, споруд та основ.

Третій розділ дисертації присвячений аналізу основних експериментальних даних. Він зокрема фокусується на аналізі впливу малоциклового знакозмінного навантаження та конструктивних аспектів на несучу спроможність нормальних та похилих перерізів дослідних зразків-балок. Детально в ньому розглядаються деформація та ширина розкриття нормальних і похилих тріщин, максимальна довжина проєкції небезпечної похилої тріщини на поздовжню вісь дослідних елементів, а також середня відстань між нормальними і похилими тріщинами, відносні деформації стиснутого бетону і розтягнутої арматури та величини прогинів дослідних зразків-балок. На підставі цих експериментальних даних було виведено адекватні експериментально-статистичні залежності основних параметрів працездатності дослідних елементів. Ці залежності дозволяють об'єктивно оцінити вплив дослідних чинників на основні параметрів несучої здатності за першою (ULS) і другою (SLS) групами граничних станів як зокрема, так і у взаємодії одного з одним. Дані про деформування, утворення тріщини та руйнування дослідних зразків-балок разом з вказаними залежностями утворюють вихідні дані для фізичних і розрахункових моделей зазначених елементів.

Доведено, що характер деформацій бетону, розтягнутої базальтопластикової арматури і зовнішнього фіброармованого вуглепластика відповідав гіпотезі плоских перерізів (Бернуллі). У балках з великими ($a/h_0 = 3$) і середніми ($a/h_0 = 2$) прольотами зрізу нормальні перерізи в зонах “чистого згину” виявилися майже збалансованими і їхнє руйнування відбувалося при одночасному досягненні закритичних деформацій у бетоні стиснутої зони та у фіброармованому вуглепластику підсилення.

Крім того, показано, що разом з підвищенням несучої здатності, в середньому, на 36% підсиленних вуглепластиковим полотном пошкоджених силовими тріщинами дослідних зразків-балок їхні прогини збільшувалися на

13 % при експлуатаційному рівні (η_1) і на 17% - перед руйнуванням (η_2). При цьому, середні прогини при η_1 досягають $l_0/140$, а при $\eta_2 - l_0/95$.

Додатково, проведено нелінійні скінчено-елементні розрахунки напруженого стану дослідних базальтобетонних балок у програмному комплексі ЛПРА-САПР версії 2021 року. Для імітації пошкоджених балок використано скінченні елементи №236 - фізично нелінійні універсальні восьмивузлові просторові ізопараметричні КЕ, призначені для аналізу міцності континуальних об'єктів та масивних просторових конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів.

Профіль балок був змодельований у формі прямокутного бруса з висотою 200 мм та шириною 100 мм. Використано реальні діаграми деформації матеріалів. Це дозволило чисельно відтворити результати експериментів, визначити найбільш вірогідні сценарії руйнування дослідних зразків (балок) та зробити достовірний прогноз їх несучої здатності.

В четвертому розділі дисертаційної роботи запропоновано методику розрахунку (коефіцієнт варіації $v=5.6$ %), що дозволяє адекватно визначити несучу здатність прогінних бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою (FRP) як без їх підсилення та без пошкоджень, так і підсиленних ФАП-CFRP елементів, що досягли граничного стану (ULS) у вигляді руйнування окремих приопорних ділянок, надмірних силових тріщин, прогинів, вибоїв, сколів тощо. Розрахунок внутрішніх зусиль в системі «пошкоджена конструкція – зовнішня арматура підсилення ФАП-FRP» в середній частині прольоту (зоні «чистого згину») допускається виконувати на основі гіпотези плоских перерізів.

Підсилення нормальних перерізів згинальних елементів рекомендується проєктувати у випадках досягнення характеристичних напружень у розтягнутій стержневій FRP (текучості у сталевій) арматурі з наступним розривом зовнішньої арматури ФАП-FRP без і з руйнуванням стиснутої зони бетону.

У розділі наведено перевірку несучої здатності похилих перерізів конструкцій після розрахунку підсилення матеріалами ФАП-FRP нормальних перерізів. Перевірка несучої здатності похилих перерізів конструкцій проводиться: за похилою стиснутою смугою між похилими тріщинами у тонких високих стінках або в елементах з невеликими прольотами зрізу ($a/d \leq 1$); на дію поперечної сили за похилою тріщиною; на дію згинального моменту за похилою тріщиною.

Також визначається несуча здатність зруйнованих або доведених до граничного стану (ULS) приопорних ділянок балкових конструкцій, підсилені матеріалами ФАП-FRP, на дію згинального моменту за критичною похилою тріщиною.

Ключові слова: деформативність, базальтобетонні балки, вуглепластикове полотно, зовнішній фібропластик, граничні стани, малоциклове ступенево зростаюче навантаження, згинальний момент, поперечна сила, комп'ютерне моделювання.

ABSTRACT

Hlibotslkyi R. V. Load-bearing Capacity of Damaged, basalt-plastic Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Construction and civil engineering. – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2024.

The dissertation study is devoted to the study of the influence of a stepwise growing sign-constant low-cycle load on the bearing capacity, crack resistance and deformability of damaged deflection basalt plastic elements reinforced with a carbon fiber web.

The **introduction** of the work provides a rationale for choosing a research topic, formulates the goals and objectives of research, the scientific novelty and practical significance of the work, presents its general characteristics and connection with scientific programs and plans.

The **first section** of the dissertation provides an overview of the state and concept of the development of methods for strengthening and calculating building structures. Experimental studies of reinforced elements are considered. From the above review of existing publications, it was concluded that the issue of bearing capacity and deformability of reinforced concrete elements reinforced by composite external reinforcement has not been studied enough. Unaddressed and unrealized issues and tasks of the influence of long-term load and operation of the stretched zone of concrete, the influence of the history of the load of the structure before its reinforcement, the assessment of the stress-strain state of the contact zone "composite-concrete," experimental studies on the effect of the appearance of vertical cracks on the delamination of reinforcement elements were established. The positions and conclusions obtained during the analysis of such experiments are poorly applicable for the development of the theory of calculating bending elements, for which the question of evaluating the adhesion of materials is the

main one. It was noted that a number of study authors received different results, despite the use of similar materials and methods.

Suggested directions for further development of the topic. The relevance of the task of accumulating experimental data required for improving the methodology for calculating the reinforcement of concrete elements by external reinforcement has been substantiated.

In the **second section** of the work, the justification and prerequisites for the selection of experimental factors, the plan of experimental studies and a detailed description of the methodology for testing prototype beam samples are given.

To achieve this goal, two series of laboratory experiments with single-prong beams reinforced with Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) were previously implemented for the actions of static low-cycle re-loading of high levels according to the state budget themes of the 0108U000559, 0121U114597 using the rotatable plan-experiment Box-Behnken design 3 factors. In these first two series, the following factors (design factors) were chosen as experimental, which changed at three levels: the relative shear span, the concrete strength class and the transverse reinforcement coefficient. In the first series of experiments, undamaged beams were tested for the effect of a stepwise increasing single static, and in the second - a low-cycle repeated load.

The concrete beams with BFRP, damaged after testing, were reinforced at the bottom in the stretched zone along their entire length (1575mm) and width ($b=100\text{mm}$) and on the supporting areas in the form of closed strips with the lengths of 150, 300 and 450 mm carbon fiber web, respectively Sika®Wrap® - 230C, bonded with two-component mastic gum Sikadur – 300 according to the established technology with preliminary surface preparation of the prototypes-beams and the use of fine-grained repair mixtures for filling the grooves, caverns and excessively open cracks.

After complete polymerization of the two-component resin, previously damaged and then reinforced with carbon fiber concrete beams with basalt-plastic reinforcement were repeatedly tested for the effect of a stepwise growing sign-

constant low-cycle transverse load before destruction. The number of repeated loads at this stage, as a rule, did not exceed 10 and increased until the stabilization of deformations in concrete, reinforcement elements and beams as a whole occurred. At the final stage of testing, with unstabilized deformations of reinforced beams, measuring instruments were removed from them and brought to destruction.

The destruction of the experimental reinforced basalt concrete beams with large ($a/d=3$) and central ($a/d=2$) shear spans corresponded to the stress-strain state of almost balanced normal cross section, that was characterized by limit deformations and tensile stresses in the external fiber-reinforced plastic (CFRP), and in the compressed zone of concrete – supercritical (in the descending section of the diagram « $\sigma_c - \varepsilon_c$ ») deformations and stresses. This destruction of test beams with large and middle spans of the cut began with the rupture of the outer reinforcement of the CFRP with carbon fiber and was accompanied by a sharp increase in stresses in the stretched basalt-plastic reinforcement of the BFRP, cracking and delamination of the protective layer of concrete and excessive uncontrolled increase in deflections.

The destruction of the beams with small ($a/d \leq 1$) shear spans was accompanied by further opening of previously formed inclined cracks and rupturing of closed carbon fiber stripes on the side faces of their support areas with different deflection increases due to the shearing deformations of separate parts of prototype beams interconnected by longitudinal and transverse rods BFRP.

The main capabilities of the LIRA-CAD software complex are considered in detail. A list of programs that interact with this complex is presented. The main theories and criteria of strength and stability that apply are also investigated. In the library of the software complex, a list of finite elements (FE) is available, which are used to simulate buildings, structures and foundations.

The **third section** of the dissertation is devoted to the analysis of the main experimental data. In particular, it focuses on the analysis of the influence of low-cycle sign-shift load and structural aspects on the bearing capacity of normal and

inclined sections of prototype beams. Such issues as the deformation and width of opening of normal and inclined cracks, the maximum length of the projection of a dangerous inclined crack on the longitudinal axis of test elements, as well as the average distance between normal and inclined cracks, the relative deformations of compressed concrete and stretched reinforcement and the deflections of test samples-beams are considered in detail. Based on these experimental data, adequate experimental and statistical dependencies of the main parameters of the performance of experimental elements were derived. These dependencies allow us to objectively assess the influence of experimental factors on the basic parameters of the bearing capacity according to the first (ULS) and second (SLS) groups of limit states, both in particular and in the interaction of one with another. Data on deformation, crack formation and destruction of test samples-beams together with specified dependencies form initial data for physical and design models of specified elements.

It is proved that the nature of deformations of concrete, stretched basaltoplastic reinforcement and external fibro-reinforced carbon plastic corresponded to the hypothesis of flat sections (Bernoulli). In beams with large ($a/h_0 = 3$) and medium ($a/h_0 = 2$) cut spans, the normal sections in the "clean bend" zones turned out to be almost balanced and their destruction occurred while simultaneously achieving closed deformations in the concrete of the compressed zone and in the fibro-reinforced carbon fiber reinforcement.

In addition, it was shown that, together with an increase in load-bearing capacity, on average, by 36%, damaged by power cracks of prototypes-beams reinforced with carbon-plastic cloth, their deflections increased by 13% at the operational level (η_1) and by 17% before destruction (η_2). At the same time, average deflections at η_1 reach $l_0/140$, and at $\eta_2 - l_0/95$.

Additionally, nonlinear finite-element calculations of the stress state of experimental basalt concrete beams in the LIRA-CAD software complex version 2021 were carried out. To simulate damaged beams, finite elements No. 236 were used - physically nonlinear universal eight-node spatial isoparametric FEs,

designed to analyze the strength of continuous objects and massive spatial structures taking into account the physical nonlinearity of materials.

The profile of the beams was modeled in the form of a rectangular bar with a height of 200 mm and a width of 100 mm. Real deformation diagrams of materials were used. This made it possible to numerically reproduce the results of experiments, to determine the most probable scenarios of destruction of prototypes (beams) and to make a reliable forecast of their bearing capacity.

In the **fourth section** of the dissertation, a technique is proposed calculation method provides for the adequate determination of bearing capacity (variation coefficient $\nu=5.6$ %) of girder concrete constructions with non-metallic composite reinforcement (FRP) both without reinforcement and damage, and reinforced CFRP elements that have reached the limit state (ULS) in the form of destruction of individual support areas, excessive cracks, deflections, depressions, chippings, etc. The calculation of internal forces in the system “damaged structure – external reinforcement FRP” in the central part of the span (zone of “pure bending”) is allowed to be carried out on the basis of the plane-sections hypothesis.

Reinforcement of normal sections of bending elements is recommended to be designed in the cases of characteristic stresses in stretched bar FRP (steel yielding) reinforcement with subsequent rupture of external reinforcement FRP without and with the destruction of concrete compressed zone.

The section shows the check of bearing capacity of inclined sections of structures after calculation of reinforcement of normal sections by FRP materials. Checking the bearing capacity of inclined sections of structures is carried out: by an inclined compressed strip between inclined cracks in thin high walls or in elements with small spans of the cut ($a/d \leq 1$); on the effect of transverse force on the inclined crack; on the action of bending moment along the inclined crack.

The bearing capacity of the destroyed or brought to the limit state (ULS) of the near-support sections of the beam structures reinforced with FRP materials for the effect of the bending moment along the critical inclined crack is also determined.

Keywords: deformability, basalt concrete beams, carbon fiber web, external fibroplastic, limit states, low-cycle stepwise increasing load, bending moment, transverse force, computer simulation.