

УДК 624.016:624.044.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.77-83](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.77-83)**А.В. Гасенко**, доц., д-р техн. наук*Навчально-науковий інститут Архітектури, будівництва та землеустрою
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава, Україна**e-mail: gasentk@gmail.com***В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна**e-mail: vvdarienko@gmail.com***М.В. Бібік**, доц., канд. техн. наук*Директор ТОВ «СОЛІД ПОЛТАВА», м. Полтава, Україна**e-mail: nbibik@gmail.com***Д.В. Бібік**, канд. техн. наук*ТОВ «ПБ «ІНТЕРСТАЛЬ», м. Полтава, Україна**e-mail: dmytro.bibik@gmail.com***В.В. Слонь**, доц., канд. техн. наук*Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон, Україна**e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com*

Огляд впливу повзучості бетону на роботу попередньо-напружених сталезалізобетонних конструкцій споруд цивільного захисту

Реологічні властивості бетону в основному визначаються його властивостями повзучості. У випадку попереднього напруження сталезалізобетонної конструкції відбувається перерозподіл зусиль в її перерізі між сильно навантаженими і малонавантаженими елементами, а саме між сталевим армуванням і бетоном. У роботі проаналізовано загальні відомості про повзучість бетону та її вплив на втрати під час попереднього напруження, в тому числі із застосуванням сучасних програм скінченно-елементного моделювання, що дозволяють задавати фізичну нелінійність бетону і його реологічні властивості.

сталезалізобетонні конструкції, попереднє напруження, повзучість бетону

Постановка проблеми. Сталезалізобетонні конструкції є одними із ефективних типів комплексних конструктивних елементів. Саме такі конструкції створюються як під час нового проектування, так і під час підсилення залізобетонних конструкцій сталевим прокатом, а сталевих – обетонуванням [9]. У кожному із зазначених випадків створення сталезалізобетонних конструкцій актуальним питанням є сумісна робота складових конструкції (прокатного і стрижневого армування з бетоном). З іншої сторони, саме за рахунок забезпечення сумісної роботи бетонної та сталеві частин, можливо створювати в них попередні напруження (зусилля), які будуть протилежні тим, що виникатимуть в робочому стані конструкції. Ця перевага сталезалізобетону дозволяє регулювати напружено-деформований стан її складових, підвищити загальну несучу здатність й жорсткість конструкції та, як результат, зекономити матеріали під час виготовлення [4]. За рахунок високого ступеня живучості, сталезалізобетон ефективно використовують для зведення споруд цивільного захисту.

Реологічні властивості бетону в основному визначаються його властивостями

повзучості, які впливають на напружено-деформований стан конструкції в часі. При попередньому напруженні сталезалізобетонної конструкції відбувається перерозподіл зусиль в її перерізі між високонавантаженими та малонавантаженими елементами, а саме між сталевим прокатним чи стержневим армуванням та бетоном. Слід зазначити, що несучий каркас будівель і споруд (крім надійності, безпечної експлуатації та економічної доцільності) повинен гарантувати функціональну придатність. Визначити функціональну придатність конструкції неможливо без правильного прогнозу перерозподілу напружень у часі між бетоном і арматурою, що виникає в результаті повзучості бетону [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перерозподіл зусиль у попередньо напружених сталезалізобетонних конструкціях, що виникає на етапах їх виготовлення, монтажу й експлуатації, дозволяє регулювати згідно ресурсоощадних проектних рішень внутрішні зусилля у перерізах цих конструкцій, в тому числі під час дії техногенних навантажень на споруди цивільного захисту. У роботі [7] виконано узагальнення конструктивних особливостей й принципів створення попереднього напруження компонентів згинаних сталезалізобетонних конструкцій суцільного поперечного перерізу, а також виокремлено серед них ефективних методів створення попередніх самоупругень – попередніх внутрішніх напружень, протилежних тим, що виникають у процесі експлуатації за допомогою конструктивних заходів чи технології будівництва без застосування енерговитратних методів процесу напруження.

Як зазначено у [7], попередні напруження у сталезалізобетонних конструкціях можливо створити шляхом влаштування додаткових попередньо напружених арматурних стержнів (затяжок) у розтягнутій зоні перерізу. Проте такі заходи одночасно із підвищенням несучої здатності й жорсткості згинаних елементів, вимагають додаткових витрат на матеріали і саме влаштування цих стержнів [6]. З іншого боку ресурсоощадні попередні самоупругення в елементах згинаних сталезалізобетонних конструкцій можливо створити за рахунок вдало підібраної конструкції вузлів і розробки технології виготовлення чи попередньої укрупнювальної збірки під час монтажу конструкцій [4]. Наприклад, самонатяг встановленої ззовні затяжки під час навантаження можливо виконати за допомогою системи поперечних стержнів, важільно-стрижневої чи важільно-коткової систем. Також, конструктивно забезпечивши нерозрізну схему роботи декількох сталезалізобетонних конструкцій у суміжних прольотах, можливо досягти раціонального перерозподілу зусиль в їх перерізах шляхом постадійної схеми бетонування верхньої монолітної залізобетонної полицки та відповідним включенням розтягнутої сталевий частини перерізу в роботу.

Під час експлуатації попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій при тривалій дії навантаження основною причиною збільшення прогинів буде повзучість бетону стиснутої зони перерізу. У процесі повзучості, напруження в бетоні зменшуються, а в арматурі, навпаки, зростають [2]. Внаслідок перерозподілу напружень, зусилля, що виникають у стрижневій арматурі можуть досягати критичних значень. У [1] експериментально встановлено, що між кількісною оцінкою тривалих деформацій у стиснутій зоні бетону та деформаціями бетонних призм при однаковому рівні навантаження існує суттєва відмінність. Цю відмінність слід враховувати шляхом множення характеристики повзучості бетону при осьовому стиску на коефіцієнт повноти епюри напружень у стиснутій зоні бетону. Кривизну згинальних залізобетонних елементів слід визначати по нормативній методиці розрахунку прогинів із врахуванням уточнюючих коефіцієнтів врахування повзучості бетону, що залежать від віку бетону в момент навантаження, модуля пружності відкритої поверхні бетону та відносної вологості середовища експлуатації конструкції.

Для коректного врахування функції повзучості бетону із врахуванням зміни температури оточуючого середовища під час скінченно-елементних розрахунків залізобетонних конструкцій, у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» реалізовано декілька спеціальних скінченних елементів [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Із аналізу існуючих результатів досліджень та публікацій встановлено, що детальному вивченню реологічних властивостей бетону у попередньо напруженому залізобетоні присвячено досить велика кількість теоретичних та експериментальних досліджень, що безумовно доводить актуальність даного питання. Проте вивченню впливу повзучості бетону у згинаних сталезалізобетонних конструкціях, що у порівнянні із типовими попередньо напруженими залізобетонними конструкціями мають значно вищий коефіцієнт армування поперечного перерізу, приділено досить незначний обсяг уваги.

Завданнями проведених авторами досліджень є:

1) охарактеризувати повзучість бетону як складової втрат попередньо-напружених комбінованих сталезалізобетонних конструкцій; виконати аналіз зміни коефіцієнта повзучості бетону в часі в залежності від температури та рівня навантаження;

2) розглянути алгоритм врахування повзучості бетону під час створення розрахункових моделей попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій в програмах скінченно-елементного моделювання.

Виклад основного матеріалу. *Будова бетону.* Макроскопічний розгляд бетону показує, що він має неоднорідну будову. Вона утворена зернами дрібного й крупного заповнювачів, що зв'язані між собою затверділим цементним каменем у одне монолітне тіло (див. схему на рис. 1). Бетон має велику кількість мікропор й капілярів. Цементний камінь складається з пружних затверділих кристалічних зростків, а також із пластичної пористої маси, що прийнято називати гелем. Така досить складна структура бетону утворюється під час приготування бетонної суміші та у процесі його твердіння. Досить тривалі процеси кристалізації й зменшення об'єму гелю суттєво впливають на міцність та деформативність бетону. Саме наявність у структурі бетону пластичного гелю спричинює його повзучість в часі. Саме через неоднорідну структуру бетону, під час навантаженні у ньому виникає складний напружено-деформований стан. У стиснутому бетонному елементі напруження концентруються на більш жорстких частинках крупного заповнювача, які мають більш високий модуль пружності. Унаслідок цього на площинах з'єднання цих частинок виникають зусилля, які намагаються порушити зв'язок між ними. Одночасно у місцях послаблення тріщинами та пустотами концентруються стискальні й розтягувальні напруження. Довільне розташування зерен крупного заповнювача у затверділому бетоні і пор у цементному камені призводить до істотних розбіжностей показників міцності зразків, які виготовлені з одного бетону. Тому оцінка міцності бетону базується на випробуваннях спеціальних зразків (кубів та призм) і визначенні їх головних характеристик, саме які приймають для розрахунку комбінованих сталезалізобетонних конструкцій.

Види деформацій бетону. У бетоні розрізняють деформації двох основних видів (див. схему на рис. 2): об'ємні, що виникають у всіх напрямках під впливом усадки під час твердіння бетону, зміни температури та вологості, а також силові, що розвиваються головним чином в напрямку дії внутрішніх сил під час навантаження конструкції [5]. Силові поздовжні деформації супроводжуються поперечними, що обумовлено початковим коефіцієнтом поперечних деформацій Пуассона (для бетону $\nu = 0,2$). Силові деформації залежно від характеру навантаження і його тривалості поділяються на три підвиди: при одноразовому завантаженні короткочасним навантаженням, при довготривалій дії навантаження і при багаторазово повторюваній дії навантаження.

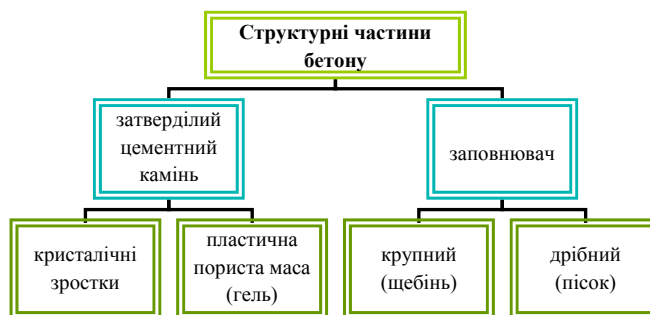


Рисунок 1 – Класифікаційна схема будови бетону

Джерело: розроблено авторами

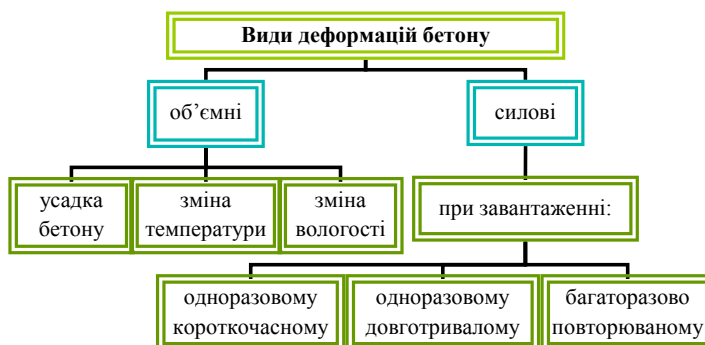


Рисунок 2 – Класифікаційна схема видів деформацій бетону

Джерело: розроблено авторами

Як було зазначено, бетон є пружно-пластичним матеріалом. Тому в ньому поряд з пружними деформаціями виникають непружні чи пластичні незворотні (тобто такі, що не зникають після зняття навантаження). Під час тривалої дії навантаження на комбінований сталезалізобетонний елемент непружні деформації у бетоні з часом зростають. Найбільший зріст непружних деформацій спостерігається протягом перших трьох-чотирьох місяців експлуатації конструкції, а загалом він може продовжуватися аж декілька років. Властивість бетону акумулювати непружні деформації при тривалій дії навантаження називають *повзучістю бетону*. Непружні деформації повзучості бетону можуть бути у 3...4 рази більшими за пружні деформації. Суть виникнення повзучості пояснюється будовою бетону, тривалими процесами кристалізації й зменшенням кількості гелю. Під дією зовнішнього навантаження напруження, що виникають в бетоні, перерозподіляються із в'язкої гелевої структури на кристалічні зростки та зерна заповнювачів. З часом процес перерозподілу напружень стихає і деформування припиняється, чим пояснюється сповільнення повзучості напруженого бетону. За тривалої дії зовнішнього постійного навантаження деформації повзучості у бетоні проявляються вільно, напруження залишаються незмінними. За наявності у бетоні внутрішніх арматурних стержнів, що не дозволяють вільно проявлятися у бетоні деформаціям повзучості, напруження не будуть залишатися постійними, а з часом будуть зменшуватися. Це явище називають релаксацією напружень у бетоні.

Наведемо основні закономірності розвитку повзучості бетону. Незалежно від швидкості навантаження елемента до однакового рівня напружень в бетоні, деформації повзучості бетону будуть однаковими. Завантажений в ранньому віці бетон має більші показники повзучості ніж старий. Повзучість бетону в сухому середовищі значно більша ніж у вологому. Повзучість бетону зростає зі збільшенням водо-цементного

відношення й кількості цементу на одиницю об'єму бетонної суміші. Із збільшенням міцності зерен заповнювачів повзучість зменшується.

Алгоритм врахування повзучості бетону під час створення скінченно-елементних (СЕ) розрахункових моделей попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій (СЗБК). Популярність використання методу СЕ для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій сприяла створенню ряду комерційних пакетів програм, серед яких в механіці можна відзначити NASTRAN, ANSYS, SCAD, Lira, Cosmos, ASKA. Ці програми використовуються для статичних, динамічних та інших розрахунків складних композитних конструкцій із нерегулярною геометричною конфігурацією й несистематичною фізичною структурою. За допомогою цих програм можливо враховувати фізичну нелінійність бетону, геометричної нелінійності роботи композитного сталезалізобетонного елемента та реологічні властивості бетону (рис. 3).

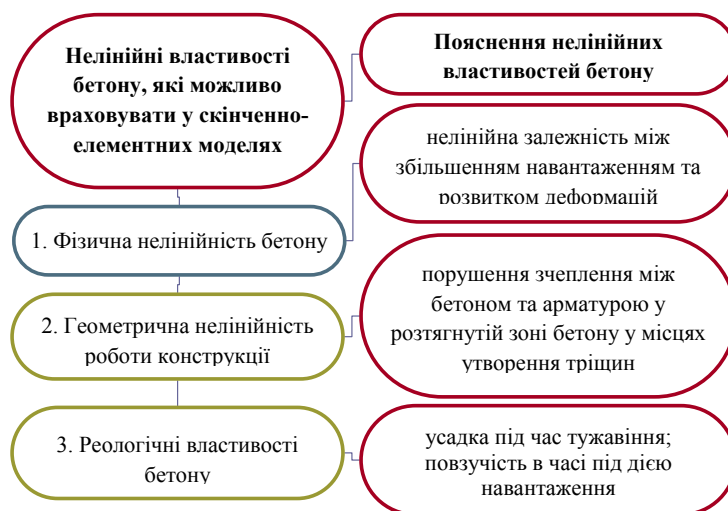


Рисунок 3 – Врахування нелінійних реологічних властивостей бетону під час СЕ моделювання
Джерело: розроблено авторами

Достовірність результатів СЕ моделювання НДС СЗБК та їх схожість із результатами теоретичних розрахунків згідно з діючими нормативними документами і результатами експериментальних досліджень буде тим вище, чим точніше буде створена СЕ модель комбінованих конструкцій [8]. Під створенням СЕ моделі СЗБК мається на увазі відповідність геометричних параметрів моделі, фізико-механічних властивостей матеріалів та граничних умов дійсним умовам завантаження та закріплення. Модель створюють за алгоритмом:

- створення об'ємної геометричної моделі сталезалізобетонного елемента;
- задавання дволінійної діаграми роботи сталевих стержневих чи прокатних елементів; й реологічних властивостей бетону;
- вибір типу, розмірів і властивостей СЕ, розбиття на них геометрії моделі;
- задавання попереднього натягу сталевих стержневих чи прокатних елементів;
- задавання в'язей, що прикладаються до опорних площин конструкції;
- задавання зосереджених чи розподілених навантажень на площадках чи об'ємах;
- видалення зайвих елементів геометрії чи частин скінченно-елементної сітки;
- задавання характеристик, проведення і контроль процесу розрахунку СЕ моделі;
- формування розподілів параметрів напружено-деформованого стану конструкцій.

Висновки. Завдяки наявності у бетоні пластичної пористої маси – гелю – при тривалій дії навантаження, в ньому накопичуються непружні деформації, що враховуються повзучістю бетону. Її відносять до групи других втрат попереднього

напруження конструкцій. Згідно ДБН В.2.6-98:2009 вплив повзучості слід враховувати коефіцієнтом повзучості, що апроксимується в часі при постійному напруженому стані бетону певною кривою. У сучасних програмах скінченно-елементного моделювання роботи конструкцій можливо враховувати нелінійні реологічні властивості бетону.

Врахування під час чисельного моделювання згинаної попередньо-напруженої сталезалізобетонної конструкції споруд цивільного захисту впливів повзучості, приводить до зменшення напружень у стиснутій зоні бетону, збільшення напружень в розтягнутій арматурі та збільшення прогинів.

Список літератури

1. Бабич В.Є., Поляновська О.Є., Борейчук Л.М. Аналіз розрахунку деформацій залізобетонних згинальних елементів за різними методиками. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 32. С. 121-128.
2. Бамбура А.М., Дорогова О.В., Петрук Ю.М. Напружено-деформований стан, несуча здатність та момент виникнення тріщин постнапружених згинних залізобетонних елементів за модифікованим деформаційним методом. *Наука та будівництво*. 2020. Том 24. Вип. 2. С. 11-18.
3. Башинська С.Ю., Барабаш М.С. Порівняльний аналіз методів чисельного моделювання пластичних деформацій бетону. *Зб. наук. пр. ПДАБА: Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2016. Вип. 91. С. 32-39.
4. Бібик Д.В., Семко О.В. Визначення внутрішніх зусиль у перерізі сталезалізобетонної балки з урахуванням стадійності виготовлення. *Зб. наук. пр. ПДАБА: Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вип. 56. С. 47-53.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2009.
6. Deng Yu, Shen, M., Zhang H., Zhang P., Terry Y.P. Yuen, Hansapinyo C. et al. Experimental and analytical studies on steel-reinforced concrete composite members with bonded prestressed CFRP tendon under eccentric tension. *Composite Structures*. 2021. Vol. 271. P. 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114124>
7. Hasenko A.V. Previous self-stresses creation methods review in bent steel reinforced concrete structures with solid cross section. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. Vol. 2 (57). P. 82-89. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2589>
8. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V. & Andriets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 77. P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
9. Semko O.V. & Hasenko A.V. Classification of self-stressed steel-concrete composite structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 181. P. 367-374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_34

References

1. Babych, V.Ie. Polianovska, O.Ie. & Boreichuk, L.M. (2016). Analiz rozrakhunku deformatsij zalizobetonnykh zghynal'nykh elementiv za riznymi metodykami [Analysis of calculation of deformations of reinforced concrete bending elements by various methods]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 32, 121-128 [in Ukrainian].
2. Bambura, A.M., Dorogova, O.V. & Petryk, Yu.M. (2020). Napruzhenno-deformovanyy stan, nesucha zdatsnist' ta moment vynyknennya trishchyn postnapruzhenykh z hynnykh zalizobetonnykh elementiv za modyfikovanyim deformatsiynym metodom [The stress-strain state, bearing capacity and moment of cracking of post-stressed bending reinforced concrete elements according to the modified deformation method]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 24 (2), 11-18 [in Ukrainian].
3. Bashyns'ka, S.Yu. & Barabash, M.S. (2016). Porivnial'nyj analiz metodiv chysel'noho modeliuвання plastychnykh deformatsij betonu [Comparative analysis of methods of numerical modeling of plastic deformations of concrete]. *Zb. nauk. pr. PDABA: Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia – Coll. of science PDABA Ave: Construction, materials science, mechanical engineering*, 91, 32-39 [in Ukrainian].
4. Bibik, D.V. & Semko, O.V. (2010). Vyznachennia vnutrishnykh zusyly' u pererizi stalezalizobetonnoi balky z urakhuvanniam stadijnosti vyhotovlennia [Determination of internal forces in the cross-section of a steel-reinforced concrete beam, taking into account the stages of production]. *Zb. nauk. pr.*

- PDABA: Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia – Coll. of science pr. PDABA: Construction, materials science, mechanical engineering, 56, 47-53 [in Ukrainian].*
5. Betonni ta zalizobetonni konstruktzii. Osnovni polozhennia proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions of design]. (2009). *DBN V.2.6-98:2009*. Kyiv: M-vo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [in Ukrainian].
 6. Deng, Yu, Shen, M., Zhang, H., Zhang, P., Terry, Y.P. Yuen, Hansapinyo, C. et al. (2021). Experimental and analytical studies on steel-reinforced concrete composite members with bonded prestressed CFRP tendon under eccentric tension. *Composite Structures, Vol. 271*, P. 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114124> [in English].
 7. Hasenko, A.V., (2021). Previous self-stresses creation methods review in bent steel reinforced concrete structures with solid cross section. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, Vol. 2 (57)*, P. 82-89. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2589> [in English].
 8. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriiets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Vol. 77*, P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92> [in English].
 9. Semko, O.V. & Hasenko, A.V. (2022). Classification of self-stressed steel-concrete composite structures. *Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 181*, P. 367-374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_34 [in English].

Anton Hasenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Educational and Scientific Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Victor Dariienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mykola Bibik, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Director of "SOLID POLTAVA" LLC, Poltava, Ukraine

Dmytro Bibik, Ph.D. tech. sci.

«PB «INTERSTAL» LLC, Poltava, Ukraine

Viktor Slon, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Kherson State agrarian and economic University, Kherson, Ukraine

Review of the influence of concrete creep on the operation of pre-stressed steel-reinforced concrete structures of civil defense structures

The rheological properties of concrete are mainly determined by its creep properties, which affect the stress-strain state of the structure over time. In the case of pre-stressing a steel-reinforced concrete structure, forces are redistributed in its section between highly loaded and lightly loaded elements, namely between steel reinforcement and concrete. It should be noted that the supporting frame of buildings and structures (in addition to reliability, safe operation and economic feasibility) must guarantee functional suitability. It is impossible to determine the functional suitability of the structure without a correct prediction of the redistribution of stresses in time between the concrete and the reinforcement, which occurs as a result of the creep of concrete. According to the current norms of DBN B.2.6-98:2009 and EN (Eurocode 2), the criterion for the appearance of the limit state of reinforced concrete structures is the achievement of limit values by the deformations of compressed concrete. Therefore, a detailed study of the rheological properties of prestressed reinforced concrete is undoubtedly an urgent issue. The paper analyzes general information about the creep of concrete and its effect on losses during prestressing, including with the use of modern finite element modeling programs, which allow not only physically nonlinear characteristics of concrete to be specified when creating models of reinforced concrete structures, but also take into account the geometric nonlinearity of the work of composite reinforced concrete structure, but also to specify the rheological properties of concrete, in particular, creep characteristics.

Conducted studies of the influence of concrete creep on the work of bent pre-stressed steel-reinforced concrete structures prove that the main reason for the increase in deflections of such structures under long-term load action is the creep of concrete in the compressed cross-sectional area. Taking into account during the numerical modeling of the bent pre-stressed combined structure the influences of the second order, namely the creep in time of the stressed concrete, leads to a decrease in the stresses in the compressed zone of the concrete by 6.5%, but to an increase in the stresses in the stretched reinforcement by 0.6% and , which is most significant, to increase the deflections of the structure by 23%.

steel-reinforced concrete structures, pre-stressing, concrete creep

Одержано (Received) 20.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023