

Аналіз досліджень в області надійності залізобетонних елементів з високоміцного бетону

Карпенко О.А.

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»,
м.Київ

Проведений огляд відомих пропозицій та методик наукових праць по застосуванню високоміцного бетону в залізобетонних елементах та встановлення області його найбільш раціонального застосування. Виконаний аналіз вишукування надійності будівельних конструкцій у стиснутих залізобетонних елементах з високоміцного бетону.

Сьогодні спостерігається неухильний ріст інтересу до використання в конструкціях будівель і споруд бетонів високої міцності (класів вище *B60* і *B80* – високоміцного). Термін «високоміцний бетон» у сьогодення – достатньо умовне поняття, котре не обмежується судженням тільки про його високу міцність. Цей матеріал повинен володіти підвищеними фізико-механічними характеристиками: міцністю, деформаційністю, довговічністю, щільністю, корозійною стійкістю.

Сучасне будівництво характеризується збільшенням поверховості будівель, при цьому зростають навантаження на несучі конструкції, що обумовлює потребу використання нових будівельних матеріалів, зокрема високоміцних бетонів. Серед переваг останніх можна виділити: зменшення площі поперечного перерізу при збільшенні несучої здатності елементів; створення витонченіших контурів при зростанні прольотів конструкцій, що згинаються; можливість використання однакових розмірів опалубки в умовах заводського виробництва колон, розрахованих на різне наванта-

ження, або для зведення колон усіх поверхів при монолітному будівництві (високоміцний бетон застосовується на нижніх поверхах); скорочення витрат бетону та арматури, відповідно, зменшення маси транспортування; підвищена відпускна міцність; вища щільність, водо- та газонепроникність за рахунок низького вмісту капілярних пор; збільшена зносостійкість; підвищений корозійний захист арматури.

Високоміцні бетони, відрізняються високою щільністю і, відповідно, являються довговічними і стійкими до агресивних і атмосферних впливів, що збільшує термін придатності конструкцій із таких бетонів і дозволяє застосовувати їх в більш тяжких умовах експлуатації. За кордоном бетон високої міцності (таблиця) активно застосовується в будівлях і спорудах різного призначення: багатоповерхівках, захисних оболонках атомних станцій, мостів, тунелів, морських платформах і так далі. У нас до недавнього часу його застосування стримувалось із-за недостатньої вивченості характеристик і відсутності відповідної документації. В той же час як уже було відзначено, застосування бетону високої міцності дають певні переваги у порівнянні з бетонами розповсюдженими зараз класами.

Таблиця. Значення характеристичної міцності бетону (відповідно до євростандарту EN 206-1)

Клас бетону	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
f_{ck} (МПа)	12	23	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{ck,cube}$ (МПа)	15	25	37	50	60	75	85	95	105	115	130	140

У високоміцного бетону є свої особливості, про котрі потрібно сказати хоча би декілька слів.

Чим вище міцність бетону, тим нижче його пластичні характеристики – як при короткочасному, так і при довготривалому навантаженні (повзучість), тобто такий бетон більш крихкий. Досліди експериментальних призм показують, що руйнування відбувається практично раптово, без попереднього утворення поздовжніх тріщин, властивих бетонам низької та середньої міцності.

Ця особливість руйнування бетону небезпечна тим, що у випадку експлуатаційного навантаження будуть відсутні симптоми небезпечного стану конструкції. Звідси слідує, що для високоміцних бетонів необхідно вводити підвищений коефіцієнт безпечності (у вигляді додаткового коефіцієнту умов роботи або у вигляді більш високого коефіцієнту надійності по міцності).

Експериментальні дослідження деформаційних і міцнісних параметрів високоміцних бетонів в нашій країні не виходили за рамки випробувань невеликих моделей (в основному призм). Автоматично переносити ці параметри на реальні конструкції, без врахування масштабних коефіцієнтів, навряд чи виправдано. Тому вичерпний висновок про міцнісні та деформаційні характеристики високоміцних бетонів можна зробити лише після випробувань натурних конструктивних елементів і вузлів їх з'єднання.

В Україні високоміцні бетони за винятком одиничних запитів, поки ще не затребувані. Отримання їх зв'язано із відсутністю необхідних умов, не дивлячись на присутність високоміцних гірських порід, ефективних вітчизняних і закордонних супер- і гіперпластифікаторів.

Для досягнення легкоукладності та пластичності бетонної суміші використовують пластифікатори: «Суперпластифікатор ДокПласт – М», С-3 (виробник Росія, основа – нафталіноформальдегідний полімер), SR-3 (виробник фірма Марей, основа – акрилатний полімер), SVC 5-600 (виробник фірма Sika, основа – полікарбоксилатний полімер).

Високоміцні бетони виготовляють заводи в Данії, Росії, Німеччині та інші, на жаль в Україні їх немає.

У зв'язку з цим максимально досягнутий клас бетону на рядових цементях на заповнювачах не перевищують *B60*.

Незважаючи на незаперечні переваги високоміцних бетонів, слід враховувати і ряд його недоліків:

- високоміцний бетон завжди володіє високою непроникністю, в зв'язку з чим вимагається застосування спеціальних заходів щодо забезпечення його вогнестійкості;
- руйнування високоміцного бетону із-за високої міцності і жорсткості – хрупне, що вимагає прийняття спеціальних мір при проектуванні і конструюванні конструкцій із нього: для забезпечення безпечної експлуатації будівель;
- литті і самоущільнювальні суміші, як правило, мають після укладки і початкового твердіння високу усадку, величина якої може досягати до 0,8...1,0 мм.

Значний вплив на можливість виробництва високоміцних бетонів впливає готовність промисловості будівельних матеріалів до постачанням якісних матеріалів, а саме:

- високоактивного і стабільного цементу;
- інертних заповнювачів потрібних фракцій і чистоти;
- тонкомолотих компонентів.

Мета роботи полягає в удосконаленні методів розрахунку стиснутих залізобетонних конструкцій із високоміцного бетону; отримання нових експериментальних даних про роботу вказаних конструкцій під навантаженням; встановлення області їх найбільш раціонального застосування.

Предметом дослідження є надійність роботи стиснутих залізобетонних елементів з високоміцного бетону.

Задачі дослідження:

- вивчення і аналіз сучасного стану дослідження проблем надійності залізобетонних конструкцій і зокрема конструкцій на засаді високоміцних бетонів;
- виконання комплексу експериментально-теоретичних досліджень високоміцних бетонів (класів $>C60/70$) та розроблення рекомендацій щодо застосування вказаних бетонів у будівництві;
- отримання аналітичних залежностей методів математичної статистики та чітких передумов, що є загальноприйнятими у теорії залізобетону;
- перевірка збіжності отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними власних експериментальних досліджень та досліджень інших авторів.

Існує велика кількість підходів до оцінки надійності інженерних конструкцій, в основі котрих лежать різні теорії. Для отримання адекватних результатів при визначенні рівня надійності необхідно зробити аналіз відомих методів, визначити їх переваги і недоліки, а також особливості застосування деяких із них.

Теорія надійності об'єктів будівництва в її сучасному вигляді виникла приблизно 50 років тому.

Перші роботи, в яких розглядались питання надійності будівельних конструкцій, з'явились наприкінці XIX ст. Так, в 1890 р. був надрукований російський варіант довідника Nutte з широко розвинутою системою коефіцієнтів з надійності.

Перша спроба використання ймовірних методів в розрахунках будівельних конструкцій була запропонована Качіні в 1911 р., коли він запропонував проводити статистичну обробку спостережень за навантаженнями і характеристиками міцності матеріалів.

В 1926-1929 рр. були опубліковані роботи Майера М. і Хоціалова Н.Ф. [1, 2], в котрих піддавався критиці метод розрахунку конструкцій за допущеними напруженнями і висувались ідеї ймовірного розрахунку будівельних конструкцій. Але на той час ці ідеї не знайшли підтримки.

За кордоном питанням надійності конструкцій займалися Г.Аугусті [3], А.Баратта, М.Майер, П.Марек, та інші.

Найбільш загальні питання теорії надійності будівельних конструкцій розглянуті в роботах В.В.Болотіна [4], Б.І.Беляєва [5], О.О.Гвоздева [6], А.П.Кудзіса [7], В.Д.Райзера [8], О.Р.Ржаніцина [9], М.С.Стрелецького [10] та інших дослідників. Значний вклад в питання розвитку теорії і її застосування до розрахунків конструкцій на надійність і довговічність внесли роботи А.Я.Барашикова [11], Г.І.Бердичевського, А.П.Буличєва [12], І.Д.Грудєва, Є.А.Гузєєва, М.Б.Краковського [13], О.В.Лужина [14], О.С.Личова [15], К.Е.Таля та інших дослідників.

Основні етапи розвитку теорії надійності спостерігаються при зіставленні методів Н.С. Стрелецького, А.Р. Ржаніцина і В.В. Болотіна. Їх роботи дозволили впровадити в світовій практиці напівймовірний метод розрахунку інженерних конструкцій за граничними станами. Розрахунок базується на нерівності:

$$P \leq R,$$

де P – можливе найбільше зусилля елемента;
 R – можлива найменша міцність елемента.

Згідно з цим методом, розрахунок введеться шляхом порівняння максимального з заданою ймовірністю зусилля в конструкції з мінімальним з заданою ймовірністю значенням її несучої здатності.

Ця методика з деякими змінами використовується до теперішнього часу і дозволяє оцінити роздільний вплив випадкового характеру міцністних властивостей матеріалу та навантажень.

Аналогічні методи розрахунків введені в більшості країн світу [16], де вони отримали назву напівймовірні.

Поняття надійності передбачає врахування фактору часу. В період нормальної експлуатації конструкції її надійність знижується з часом за експоненціальним законом. Будівельні конструкції, як вироби довготривалої експлуатації, в загальному проектується на різний термін. До кінця цього періоду їх фактична надійність повинна зрівнятися з розрахунковим рівнем надійності. В будь-який інший момент часу раніше, фактична надійність конструкції вище розрахункової.

При оцінці довговічності високоміцних бетонів прогнозування утворення тріщин, виникаючих на поверхності бетону в матриці внаслідок, наприклад, аутогенної усадки, до цих пір представляється проблематичним.

В умовах швидкого науково-технічного прогресу моральне старіння споруд відбувається дуже швидко в зв'язку з принциповими змінами в технології виробництва, організованого в цій споруді. В цьому випадку конструкції виявляються застарілими через відносно короткий проміжок часу їх експлуатації (через 10-15 років), не дивлячись на те, що їх фактична надійність вище розрахункової.

Інтенсивність відмов можна схематично представити у вигляді графіка (рисунок), на якому є три ділянки:

I – ділянка припрацювання, завжди існують дефектні частини, котрі відразу виходять із роботи. Для виключення цієї ділянки використовується обкатування випробування конструкції;

II – період нормальної роботи – характеризується постійним (або майже постійним) значенням) $l(t) = l = const$. Це основна стадія роботи будь-якого об'єкту, вона найбільш тривала.

III – період старіння (деградації). Необоротні фізико-механічні процеси призводять до погіршенню якості матеріалів, стиків, небезпечність відмов зростає. У підсумку об'єкт виходить з ладу.

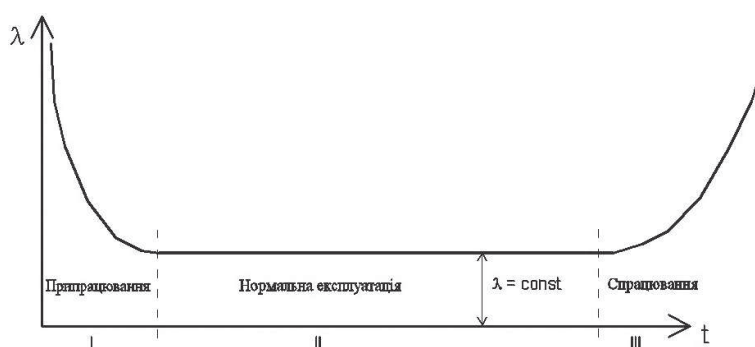


Рисунок. Інтенсивність відмов у періоди

Рівень надійності залізобетонних конструкцій по тій чи іншій властивості встановлюють на основі аналізу законів розподілення функцій характеристик і зовнішнього навантаження.

Щоб оцінити надійність конструкцій будівель і споруд, треба мати інформацію про мінливість параметрів навантажень, міцності будівельних матеріалів, відхилень від розрахункової моделі тощо. З перелічених факторів найневизначенішими є навантаження й впливи, що мають великий статистичний розкид. Для визначення надійності будівельних конструкцій, будівель і споруд велике значення має вивчення мінливості

навантажень. Рівень знань про навантаження навіть для детермінованого випадку поки що відстає від рівня знань про закони міцності.

В загальному вигляді на конструкції будівлі діють наступні фактори: навантаження, навколишнє середовище, внутрішнє джерело напружень. Причому всі ці впливи випадкові по своєму характеру і імовірність їх розподілення по видам і по часу різна і також випадкова. В загальному випадку в розрахунку конструкцій приймається, що розподілення границі міцності і напружень – нормальні. При цьому класичне поняття – запас міцності - виражається:

$$C_{np} = \Sigma_{мин} / \sigma_{макс} \text{ (граничний запас міцності),}$$

де $\Sigma_{мин}$ - запас міцності; $\sigma_{макс}$ – розрахункове (або фактичне напруження).

Середній запас міцності:

$$\sigma_{cp} = \bar{\Sigma} / \bar{\sigma},$$

де Σ, σ - випадкові перемінні, які характеризуються середніми значеннями і стандартними відхиленнями: Σ і S_z для Σ і σ і σ_σ для σ .

Тоді

$$C = (\bar{\Sigma} - kS_z) / (\bar{\sigma} + kS_\sigma).$$

Значення коефіцієнта k приймається звичайно рівним 3.

Введення методу розрахунку за граничними станами в норми проектування потребує глибшого вивчення навантажень, які діють на споруди. Особливості математичного сподівання навантажень, що їх враховують у розрахунках на надійність, тісно пов'язані з природою навантажень.

Звичайно на споруду діє кілька навантажень, кожне з яких має конкретні особливості, що їх треба вивчити. Нормуючи розрахункові значення характеристик навантажень, які безпосередньо впливають на надійність та економічність конструкцій, спираються на досвід проектування й експлуатації споруд, а також на результати досліджень статистичної природи навантажень.

Досі доволі глибоко вивчено лише кліматичні навантаження. Багато навантажень, особливо від устаткування, складованих матеріалів, людей та тварин, поки що повністю не описано статистичними моделями, і їх урахування під час проектування конструкцій ґрунтується головним чином на інженерному досвіді.

Задача теорії надійності полягає у розрахунку будівельних конструкцій таким чином, щоб в розрахунковий момент часу їх фактична

надійність опинилась би рівною розрахунковій (вироби короткочасної експлуатації).

Найбільш поширені такі методи побудови розподілення складних функцій: метод лінеаризації, метод кратного інтегрування та метод Монте-Карло [17]. Ці методи відрізняються за достовірністю отриманих результатів. Недоліком розглянутих методів являється те, що без спеціального аналізу неможливо визначити важливість або «вагомість» того чи іншого параметру в забезпеченості властивості; при зміні варіації будь-якого параметру виникає необхідність повторних обчислень.

Метод Монте-Карло є найбільш зручним і достатньо точним для ймовірності розрахунків будівельних конструкцій і споруд.

Задачі котрі вирішує метод Монте-Карло: по-перше, цей метод дозволяє моделювати будь-який процес, на протікання котрого впливають випадкові фактори. По-друге, для багатьох математичних задач, не пов'язаних з якимись випадковостями, можна штучно вигадати ймовірну модель (і навіть не одну), яка буде дозволяти вирішувати ці задачі.

Сукупність результатів проведених до теперішнього часу досліджень створила об'єктивні передумови для створення якісно нових методів оцінки надійності будівельних конструкцій.

Висновки

1. Метод теорії надійності дозволяє належним чином витлумачити нормативні навантаження і коефіцієнти запасу і відкривають шляхи для їх більш глибокого значення.
2. Забезпечення високої надійності і довговічності конструкцій з високоміцних бетонів в значній мірі залежить від заглибленого вивчення їх міцністних і деформаційних характеристик при різних навантаженнях, в тому випадку і довготривалих.
3. Розвиток методів розрахунку надійності будівельних конструкцій є актуальною науковою проблемою, яка має значне теоретичне і практичне значення.

Перелік посилань

1. **Maier M.** Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. – Berlin: Springer-Verlag, 1926.– 150 p.
2. **Хоциалов Н.Ф.** Запасы прочности//Строительная промышленность. – 1929. – №10. – С.10-15.

3. **Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф.** Вероятностные методы в строительном проектировании / Пер. с англ. Ю.Д.Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
4. **Болотин В.В.** Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
5. **Беляев Б.И.** О выборе формулы для общего коэффициента надежности при вероятностном методе расчета// Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. – №1. – С.10-13.
6. **Гвоздев А.А., Краковский М.Б., Бруссер М.И.,** и др. Связь статистического контроля прочности бетона с надежностью железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. –1985.– №3. – с. 37-39.
7. **Кудзис А.П.** Оценка надежности железобетонных конструкций. – Вильнюс: Мокслас, 1985. – 156 с.
8. **Райзер В.Д.** Теория надежности в строительном проектировании. – М.: АСВ, 1998. – 304 с.
9. **Ржаницын А.Р.** Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
10. **Стрелецкий Н.С.** Основы статистического учета коэффициента запаса прочности конструкций. – М.: Стройиздат, 1947. – 94 с.
11. **Барашиков А.Я., Подольский Д.М., Сирота М.Д.** Надійність будівель і споруд: Навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1993. –203с.
12. **Булычев А.П** Некоторые вопросы надежности строительных конструкций / Труды ЦНИИСК: Нагрузки и надежность строительных конструкций: вып. 21. – М., 1973. – С.4-13.
13. **Краковский М.Б.** Учет условий надежности при расчете железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. – 1983. – №4. – С.22-23.
14. **Лужин О.В.** Вероятностные методы расчета сооружений. – М.: МИСИ им. Куйбышева, 1983.–122 с.
15. **Лычев А.С., Корякин В.П.** Надежность железобетонных конструкций// Куйбышев: КИСИ, 1974. – 123 с.
16. **NF EN 1992-1-1.** Eurocode 2: Calcul des structures en beton. Partie 1-1: regles generales et regles pour les batiment.– AFNOR, 1992.-203 p.
17. **Соболь И.М.** Метод Монте-Карло («Популярные лекции по математике, вып. 46»)// М.: Наука, 1972. – 64 с.

Отримано 29.06.2011