

УДК 624.07.012.45:666.972

Карпенко О.А., аспірант, м.н.с.,
 Державне підприємство «Науково-дослідний
 інститут будівельних конструкцій», Київ

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ

Необхідність застосування високоміцних бетонів диктується із появою нових форм і методів при будівництві будівель сучасного типу (багатоповерхових, багатопроточних, висотних будівель та ін.), де ажурність в сполученні з великими розмірами неминує заставляють вирішувати питання зниження ваги конструкцій, що можливо здійснити тільки за рахунок зменшення перерізу. Ця задача не може бути вирішена без застосування бетонів високої міцності.

Покращення характеристик бетону повинне починатися насамперед зі збільшенням його міцнісних характеристик, тобто отримання високоміцних бетонів.

Прагнення отримати бетон з можливо більш високою міцністю властивій будівельній науці з моменту її заснування. Але вперше термін “високоміцний бетон” був введений в 1929 р. в США, де для висотного будівництва досліджувались нові склади бетонів і де в лабораторних умовах ще в 30-ті роки були отримані бетони, міцність на стиск яких досягала 130 МПа. В Європі, зокрема в ФРН, перші високоміцні бетони були отримані у 40-ві роки, знову ж в лабораторних умовах. І якщо в 1966 р. була досягнута міцність 140 МПа в лабораторії, то у 1988 р. вже в промислових умовах вироблялись тубінги із бетону С70/85. У 50-ті роки на території України в лабораторних умовах були отримані високоміцні бетони класу С60/75.

В Україні високоміцні бетони, за винятком одиничних запитів, поки ще не затребувані. Отримання їх пов'язано із відсутністю нормативних документів і рекомендацій, що регламентують застосування таких бетонів, не зважаючи на присутність високоміцних гірських порід, ефективних вітчизняних і закордонних супер- і гіперпластифікаторів.

У зв'язку з цим максимально досягнутий клас бетону на виробництві не перевищує С50/60.

Високоміцні бетони відрізняються високою щільністю і, відповідно, є довговічними та стійкими до агресивних і атмосферних впливів, що збільшує термін придатності конструкцій з таких бетонів та дозволяє застосовувати їх в більш важких умовах експлуатації. За кордоном бетон високої міцності (див. табл. 1) 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 застосування високоміцного бетону стримувалось через недостатню вивченість характеристик і відсутності відповідної нормативної документації. В той же час, як уже було відзначено, застосування бетону високої міцності дає певні переваги у порівнянні з бетонами розповсюджених зараз класів.

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

**Таблиця 1 – 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

Всебічно досліджуються характеристики бетону, визначаючи його працездатність і надійність в спорудах (Берг О.Я. [1, 2], Баженов Ю.М. [3], Бамбура А.М. [4], Волков Ю.С. [5], Митрофанов В. П. [6], Несветаев Г.В. [7,8], Чирков В.П. [9] та ін.).

Багато дослідників приходять до висновку, що розподілення міцності бетону на стиск краще всього представляти нормальним законом. Рюш і ін. знайшли, що із 829 зразків 92,8%

відповідали нормальному розподіленню. Інші зразки мали приблизно однакові позитивний і негативний коефіцієнт асиметрії або відповідали змішаному розподіленню.

Міцність бетону у спорудах, очевидно, дещо нижча, ніж в кубиках. По відповідним даним американських досліджень, міцність вирізаних із тіла бетону циліндрів коливалась від 0,74 до 0,96 (в середньому близько 0,87). Хенцель і Грубе отримали середнє співвідношення міцності кернів і кубової міцності близько 0,79.

Міцність бетону на стиск значно залежить від швидкості навантаження або деформацій. Чим вища швидкість деформування, тим більша міцність бетону на стиск. Вичерпаний підбір результатів досліджень цієї проблеми можна знайти в роботі Мюллера, Кайнцаля і Шарльє. Приведемо близькі залежності, отримані Кенігом та Даргелем, які охоплюють найбільш цікаві галузі.

При досить короткочасних (наприклад, ударних) навантаженнях спостерігається істотне підвищення міцності. Про зміну стандартного відхилення в залежності від швидкості деформування даних практично немає, але вважається, що ці явища відносно малі.

Згідно з отриманими даними, коефіцієнт варіації міцності дещо більший, ніж коефіцієнт варіації міцності бетону на стиск. Для міцності на розтяг можна прийняти нормальне розподілення.

Застосування високоміцних бетонів має наступні переваги:

- зменшення габаритів опалубки колон, балок і стінових елементів;
- зменшення будівельної товщини або збільшення несучої здатності конструкцій, що працюють на згин;
- утворення більш витончених контурів при збільшенні довжини прольоту конструкцій, що працюють на згин (багатопрогонові мости);
- однакові розміри опалубки в умовах заводського виробництва колон, розрахованих на різне навантаження, або для виробництва колон для всіх поверхів при монолітному будівництві (високоміцний бетон на нижніх поверхах);
- скорочення витрат бетону і арматури і, відповідно, транспортованої і монтажної ваги, більш висока початкова міцність, більш рання розпалубка і попереднє обтиснення, що забезпечує більш ранню експлуатацію елемента;
- більш висока щільність, водо- і газонепроникність за рахунок низького вмісту капілярних пор;
- більш висока зносостійкість;
- підвищена стійкість до хімічно активних речовин.

Застосування високоміцних бетонів особливо доцільно і дає найбільший ефект в попередньо напружених конструкціях і елементах, що працюють на стиск.

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

- руйнування високоміцного бетону через високу міцність і жорсткість – крихке, що вимагає прийняття спеціальних заходів 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/м.

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

- високоактивного і стабільного цементу;
- інертних заповнювачів потрібних фракцій та 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 основі високоміцних бетонів;

- виконання комплексу експериментально-теоретичних досліджень високоміцних бетонів (класів понад С60/70) 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.

В проблемі забезпечення надійності будівельних конструкцій суттєву роль відіграють правила розрахунку, представлені в будівельних нормах. Вони визначають очікуваний рівень надійності, котрий прямо пов'язаний з витратою матеріалів та вимогами до якості конструкцій і технологічних процесів, а значить, і вартістю конструкцій. Комплексна безпека об'єктів повинна забезпечуватися на основі аналізу ризику і зниження його до рівня допустимого. Це і являється єдиним універсальним підходом до оцінки безпечності, виробленим в світовій практиці.

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 їхні 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 розглядалися питання надійності будівельних конструкцій, з'явилися наприкінці XIX століття. Так, в 1890 році був надрукований російський варіант довідника Hütte з широко розвинутою системою коефіцієнтів з надійності.

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

В 1926-1929 рр. були опубліковані роботи Майєра М. і Хоціалова Н.Ф. [10, 11], в котрих піддавався критиці метод розрахунку конструкцій за допустимими напруженнями і висувались ідеї ймовірнісного розрахунку будівельних конструкцій. Але на той час ці ідеї не знайшли підтримки.

За кордоном питанням надійності конструкцій займалися Г.Аугусті [12], А.Баратта, М.Майєр, П.Марек, та інші.

Найбільш загальні питання теорії надійності будівельних конструкцій розглянуті в роботах В.В. Болотіна [13], Б.І. Беляєва [14], О.О. Гвоздева [15], А.П. Кудзіса [16], В.Д. Райзера [17], О.Р. Ржаніцина [18], М.С. Стрелецького [19] та ін. Значний вклад в питання розвитку теорії і її застосування для розрахунків конструкцій на надійність і довговічність внесли роботи А.Я. Барашикова [20], Г.І. Бердичевського, А.П. Буличєва [21], І.Д. Грудева, Є.А. Гузеєва, М.Б. Краковського [22], О.В. Лужина [23], О.С. Личова [24], В.Г. Пошивача [25], К.Е. Таля [26] та інших дослідників.

Основні етапи розвитку теорії надійності спостерігаються при зіставленні методів Н.С. Стрелецького, А.Р. Ржаніцина і В.В. Болотіна. Їхні роботи дозволили впровадити в світовій практиці напівймовірнісний метод розрахунку інженерних конструкцій за граничними станами. Розрахунок базується на нерівності (1):

$$P \leq R,$$

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

Згідно з цим методом, розрахунок введеться шляхом порівняння максимального із заданою ймовірністю зусилля в конструкції з мінімальною заданою ймовірністю значенням її несучої здатності. Ця методика з деякими змінами використовується до теперішнього часу і дозволяє оцінити роздільний вплив випадкового характеру міцнісних властивостей матеріалу та навантажень. Аналогічні методи розрахунків введені в більшості країн світу [27], де вони отримали назву напівймовірнісні.

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 проектуються на різний термін. До кінця цього періоду їхня фактична надійність повинна зрівнятися з розрахунковим рівнем надійності.

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

Деформації високоміцного бетону знижуються при зменшенні вмісту цементного каменя, кількості води у продуктах гідратації цементу та підвищенні його щільності. З підвищенням міцності бетону росте і його крихкість, знижуються пластично-деформаційні властивості, що тягне за собою практично миттєве руйнування матеріалу при досягненні ним граничного стану. Уже назрівають пропозиції щодо введення підвищених коефіцієнтів безпеки і надійності при роботі конструкцій із високоміцного бетону.

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 їхньої експлуатації (через 10-15 років), не зважаючи на те, що їхня фактична надійність вище розрахункової.

Інтенсивність відмов можна схематично представити у вигляді графіка (див. рис. 1), 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, небезпека відмов зростає. У підсумку об'єкт виходить з ладу.

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



Рисунок 1 - Інтенсивність відмов у періоди

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 й імовірність їх розподілення по видам та 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:

$$C_{np} = \Sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (\text{граничний запас міцності}),$$

де Σ_{\min} - запас міцності; σ_{\max} - розрахункове (або фактичне напруження).

Середній запас міцності:

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

де: Σ, σ - випадкові змінні, які характеризуються середніми значеннями і стандартними відхиленнями: $\bar{\Sigma}$ і S_z для Σ і $\bar{\sigma}$ 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, складових 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 їхня фактична надійність виявилась би рівною розрахунковій (вироби короткочасної експлуатації).

Найбільш поширені такі методи побудови розподілення складних функцій: метод лінеаризації, метод кратного інтегрування та метод Монте-Карло [28]. 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 буд е дозволяти вирішувати ці задачі.

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

Загальні висновки

1. Метод теорії надійності дозволяє належним чином витлумачити нормативні навантаження, 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 поглибленого вивчення їх міцністних і д еформаційних характеристик при різних навантаженнях, в тому числі і довготривалих.

3. Розвиток методів розрахунку надійності будівельних конструкцій з високоміцних бетонів є актуальною науковою проблемою, яка має значне теоретичне і практичне значення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон// М.: Стройиздат, 1971. – 196 с.
2. Берг О.Я., Рожков А. И. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений. Труды ЦНИИС, вып. 70. «Транспорт», 1969.
3. Баженов Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии/ Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону. - М., 2001.

- 91-101.

4. Бамбура А.М. Точність і надійність розрахункового апарату на основі реальних діаграм деформування бетону та арматури і деформаційного методу розрахунку / Бамбура А.М., Безбожна М.С. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. - Рівне, 2008. - Вип. 16. - Част. 2 – с. 55-60.
5. Волков Ю.С. Применение сверхпрочных бетонов в строительстве/ Ю.С. Волков // Бетон и железобетон. - 1994. - №7. - 27-31.
6. Митрофанов В. П., Арцев С. И. Предельная сжимаемость бетона нормальных сечений железобетонных элементов// Проблемы теории і практики залізобетону: Зб. наук. статей, присвячений пам'яті проф. М.С.Торяника. – Полтава: ПДТУ імені Юрія Кондратюка, 1997. – с. 333-337.
7. Несветаев Г.В. К обоснованию нормирования показателей назначения высокопрочных бетонов при сжатии // Известия РГСУ — 1998 № 2. - С. 94-102.
8. Несветаев Г.В. Перспективы применения высокопрочных бетонов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь- 7 межд. нуч.-метод. семинар-Брест, 2001. С. 313-318.
9. Чирков В.П., Лобанов А.Е. Статистическая характеристика бетона // Вопросы надежности железобетонных конструкций . - Куйбышев, КуИСИ, 1977. - с. 93-96с.
10. Maier M. Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. - Berlin: Springer-Verlag, 1926.- 150 p.
11. Хоциалов Н.Ф. Запасы прочности // Строительная промышленность. – 1929. - №10. - С. 10-15.
12. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании /Пер. с англ. Ю.Д.Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
13. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 1982. - 351 с.
14. Беляев Б.И. О выборе формулы для общего коэффициента надежности при вероятностном методе расчета // Строительная механика и расчет сооружений. -1986.- №1. - с. 10-13.
15. 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.
16. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций// Вильнюс: Мокслас, 1985. – 156 с.
17. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании // М.: - АСВ, 1998. – 304 с.
18. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. - М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.
19. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности конструкций. - М.: Стройиздат, 1947. - 94 с.
20. Барашиков А.Я., Подольский Д.М., Сирота М.Д. Надійність будівель і споруд: Навчальний посібник. – К. :ІСДО, 1993. -203с.
21. Булычев А.П. Некоторые вопросы надежности строительных конструкций / Труды ЦНИИСК: Нагрузки и надежность строительных конструкций: вып. 21. - М., 1973. - с.4-13.
22. Краковский М.Б. Учет условий надежности при расчете железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. – 1983. - №4. – с. 22-23.
23. Лужин О.В. Вероятностные методы расчета сооружений. – М.: МИСИ им. Куйбышева, 1983.-122 с.
24. Лычев А.С., Корякин В.П. Надежность железобетонных конструкций // Куйбышев: КИСИ, 1974. – 123 с.
25. Пошивач В.Г. Надежность и контроль качества изгибаемых железобетонных конструкций: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Киев, 1997. – 151 с.
26. Таль К.Э. Вопросы надежности железобетонных конструкций за рубежом //Бетон и железобетон, 1973. – N11. – с. 42-43.
27. NF EN 1992-1-1. Eurocode 2: Calcul des structures en béton. Partie 1-1: règles générales et règles pour les bâtiment.- AFNOR, 1992.-203 p.
28. Соболев И.М. Метод Монте-Карло (“Популярные лекции по математике, вып. 46”)// М.: Наука, 1972. – 64 с.