

УДК 624.012

Ю.А. Клімов, Л.І. Кривельов

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Подано аналіз праць XIII конгресу FIP (Міжнародної федерації попередньо напруженого залізобетону). Наукові дослідження та технічні рішення залізобетонних конструкцій, які реалізовано у розвинених країнах, визначили такі головні напрямки вдосконалення залізобетону в наступному тисячолітті: вдосконалення системи даних щодо якості високоміцних бетонів, системи даних щодо якості та конструкційних рішень арматури з неметалевих волокнистих матеріалів, енергозберігаючих технологій виготовлення залізобетону, розробка і дослідження спеціальних бетонів та розробка і дослідження перспективних технічних рішень.

Необхідність вдосконалення залізобетонних конструкцій формує новий перелік досліджень і стимулює створення на їхніх засадах нових конструкцій. В цьому переліку на першому місці стоїть комплекс проблем, пов'язаних із застосуванням високоміцних матеріалів, які дозволяють досягти значного зниження матеріаломісткості конструкцій, праце- і енерговитрат. Разом з тим залишається актуальною і проблема дослідження низькоміцних бетонів, які застосовуються в конструкційних заповненнях, у штучних основах дорожніх і аеродромних покриттів, у гібридних конструкціях, де в напружених зонах застосовуються високоміцні бетони (ВМБ), а в заповненні ненапружених зон – низькоміцні.

Інша проблема також має комплексний характер, оскільки охоплює енергозберігаючі технології, які тісно пов'язані з екологією, і власне екологічні технології, що передбачають використання відходів і матеріалів, які використовуються повторно у бетонах.

На вирішення цих проблем, на думку учасників XIII конгресу FIP, який відбувся в Амстердамі в 1998 році, будуть спрямовані зусилля дослідників у наступному тисячолітті [1]. Зокрема, мають бути вирішені такі задачі: вдосконалення системи даних про якості ВМБ, вдосконалення системи даних про якості та конструкційні рішення високоміцної арматури з волокнистих неметалевих матеріалів, розробка і дослідження спеціальних бетонів, дослідження перспективних технічних рішень, вдосконалення технології заводського виготовлення конструкційних елементів.

Аналіз реалізації неординарних проектів свідчить про стійку тенденцію до збільшення міцності бетонів, які застосовуються у будівництві. Передбачається, що така тенденція буде існувати і в майбутньому (рис. 1).

В сучасному будівництві кубикова міцність в 120 МПа не є рекордною для ВМБ. Так званий реактивний порошок бетон (RPB) у перспективі може мати кубикову міцність 200–800 МПа, міцність при розтягуванні – 25–150 МПа, енергію руйнування – 30 кДж/м² та об'ємну масу 2500–3000 кг/м³.

Головним технологічним напрямком створення ВМБ є зниження розмірів фракцій складових бетонної суміші, що дозволяє у сполученні з ефективними суперпластифікаторами досягти високого рівня щільності укладки. Складовими такої програми є:

– поліпшення однорідності бетону шляхом зниження максимальних розмірів складових;

- створення й оптимізація щільної «упаковки» внаслідок застосування дрібних і найдрібніших матеріалів;
- зниження ролі води в бетоні (негідратований цемент при цьому буде виконувати роль найдрібнішого заповнювача, що збільшить щільність «упаковки»);
- додавання коротких волокон з метою збільшення гнучкості;
- організація твердіння під тиском зі збільшенням температури чи без цього.

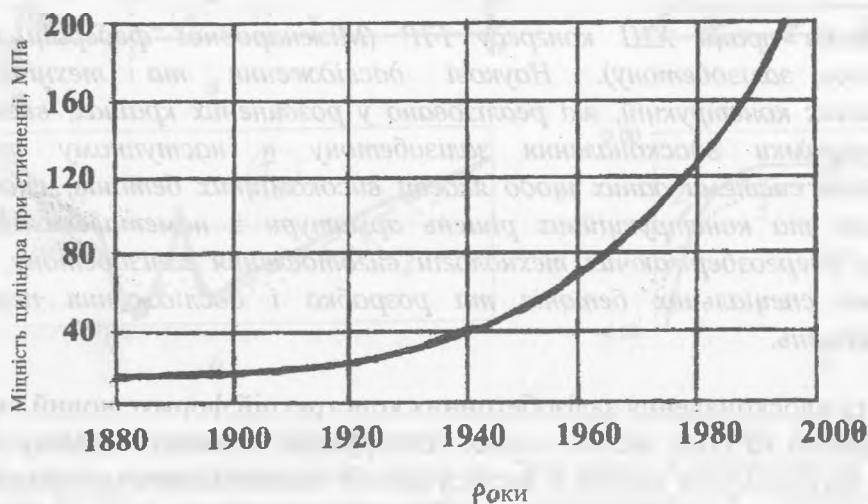


Рис. 1. Прогнозоване зростання міцності бетонів, які застосовуються у будівництві

Підхід до визначення складу ВМБ демонструвався на порівнянні складових двох бетонів: нормального і ВМБ (табл. 1).

Таблиця 1

Склад і механічні характеристики нормального бетону і ВМБ

Складові бетонних сумішей та механічні характеристики бетонів	Кількісні показники	
	нормальний бетон	ВМБ
Цемент класу I 52,5 R, кг/м ³	400	425
Сілікагель, кг/м ³	–	42,5
Суперпластифікатор, кг/м ³	–	14,75
Вода, кг/м ³	210	130
Річний пісок (фракція 0–4 мм), кг/м ³	650	740
Дріблений крупний заповнювач (фракція ≤ 14 мм), кг/м ³	1265	1150
Міцність на 28-й день, МПа:		
стиснення циліндра	45	105
розтягнення циліндра	2,9	5,9

Практикою розробки сучасних ВМБ встановлені головні характеристики цих бетонів. Це – суперпластифікатори (ліносульфат та нафталенсульфат), зв'язуюче (суміш портландцементу, шлакопортландцементу та сілікагелю), заповнювачі (у вигляді сумішей гранітного щебню та щебню з вапняка), дуже низьке водоцементне відношення В:Ц ≈ 0,3.

Важливою якістю ВМБ є швидке набирання міцності. Більшість бетонів демонструє вже в перший день після вкладання 30 % міцності (100 % – на 28-й день). Традиційною проблемою для ВМБ є встановлення характеристик довготривалих процесів. Кількісні показники усадки і повзучості для ВМБ в середньому становлять: деформації усадки на 150–170-й день – $(250...300) \cdot 10^{-6}$, показник повзучості – $(15-20) \cdot 10^{-6}$ МПа⁻¹. Зчеплення арматури з ВМБ у порівнянні зі звичайним відбувається на значно меншій ділянці.

Ефективність ВМБ в цілому у реальному проекті транспортної споруди було продемонстровано на порівнянні варіантів із застосуванням бетонів класів В45, В65 та ВМБ класу В85. Показники трьох проектів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння техніко-економічних показників варіантів проекту транспортної споруди

Показник, %	Варіанти проекту (клас бетону)		
	В45	В65	В85
Витрати бетону	128	114	100
Витрати цементу	97	97	100
Сталь попередньо напружена	111	126	100
Вага елементів, які монтуються	104	114	100

Порівняння свідчить про ефективність варіанта з ВМБ. Незначне збільшення витрат цементу викликане додатковою роллю цементу у ВМБ, який частково є «наддрібним» інертним, що збільшує щільність «упаковки» складових бетонної суміші.

У комплексі проблема використання ВМБ вміщує в собі низку параметрів та обмежень, які розрізняються за характером та рівнем впливу. Розв'язання цієї задачі можливе на основі використання так званих експертних систем.

Зацікавленість, яка проявляється до нетрадиційних видів та матеріалів армування бетону, пояснюється високою технологічністю та можливістю надання конструкціям на основі такого армування нових якостей. В цілому нетрадиційне армування можна розподілити на дві групи: фіброве армування з коротких волокон, яке дисперсно розподіляється по всій масі бетону, і армування, зосереджене зі стрижнів та пасом із волокнистих матеріалів.

Фіброве армування зі сталі може бути виконано з високо- і низьковуглецевої сталей. Перевага має бути віддана високовуглецевій сталі, яка дозволяє досягати витрат сталі 60–100 кг/м³ бетону. У сполученні низьковуглецевої сталі з ВМБ виникає небезпека перелому волокон. Рекомендується для цих бетонів застосовувати високовуглецеві волокна з границею текучості, що дорівнює 2000 МПа. Слід зазначити, що застосування фібрового дисперсного армування у сполученні зі звичайною арматурою створює певні проблеми зчеплення останньої з бетоном. Дослідження цього фактора має бути продовжено.

Досліджено різні способи зниження крихкого руйнування бетону за допомогою дисперсного армування та певних добавок. Ефективним виявилось застосування «коктейлю» зі сталевих та поліпропіленових волокон і включення до складу бетонних сумішей мінеральних добавок – високоактивного метакаоліну, волластоніту (натуральні мікрволокна) і порошку ріоліту.

Як волокниста неметалева арматура (ВНМА) застосовується скловолокно, вуглеволокно, поліамідні волокна (арамід). Найбільш ефективною з них є арматура з вуглеволокна. На рис. 2 наведено механічні характеристики неметалевої арматури, які свідчать, що вуглеволокнистий

армуючий матеріал за міцністю та деформативністю приблизно відповідає сталевій високоміцній арматурі. Конструкційно арматура з вуглеволокна застосовується у вигляді фібрового дисперсного армування, сіток, тканин та окремих стрижнів та тросів. В перспективі ефективність ВНМА буде зростати у сполученні з надвисокоміцними бетонами класів В100–В200. Конструкції, утворені на основі таких бетонів та армовані вуглеволокнистими армуючими матеріалами, за вагою будуть конкурувати зі сталевими аналогами.



Рис. 2. Механічні характеристики неметалевої арматури:
 1 – стрижні на основі вуглеволокна; 2 – стрижні на основі вуглеволокна з попередньою витяжкою до $\sigma = 1,67$ ГПа;
 3 – стрижні на основі арамиду; 4 – стрижні на основі скловолокна

Зростання обсягів застосування ВНМА в будівництві викликає необхідність сформулювати вимоги до неї та їх стандартизувати. Таку роботу вже здійснено в США, Канаді, Європі та Японії. Стандартизовано не тільки волокна, а й деякі співвідношення волокно / зв'язуюче у виробках – джгутах, стрижнях.

Технологічні проблеми енергозберігаючих технологій бетону полягають у збільшенні зручності закладки бетонної суміші та у використанні самопрогріву. Створюються бетони, які не потребують вібрування при вкладанні, так звані самовкладаємі бетони. Застосування ефективних суперпластифікаторів – полікарбосилітового ефіру, бетанафтаден сульфату, меламін сульфонату та нафтаден сульфату у сполученні зі зв'язуючим (золотшлакопортландцементом) дозволяє досягати рухливості бетону, яка відповідає відношенню В:Ц= 0,75–0,81. Застосування суперпластифікаторів дозволяє також досягати швидкого набору міцності без пропарювання.

Адіабатичний самопрогрів прискорює процес гідратації цементу, знижує вологість бетону, але разом з тим і збільшує внутрішній капілярний тиск води, яка не вступила у реакцію з цементом. Запобігти цьому пропонується за допомогою автоматизованого керування технологічним циклом вкладання, схоплення та твердіння бетону, використання адіабатичного тепла реакції гідратації цементу, зниження на основі автоматизованого керування прогрівом ризику тріщиноутворення і підвищення якості залізобетонних конструкцій.

Сучасний залізобетон характеризується застосуванням високоміцних матеріалів, якості яких можуть бути використані повною мірою на основі попереднього напруження арматури. Необхідно відзначити зростаючу роль і наступного попереднього напруження арматури, яке вважається, крім інших галузей будівництва, багатообіцяючим елементом дорожнього будівництва та будівництва аеродромних покриттів. Обсяги будівництва бетонних покриттів доріг у різних розвинених країнах значно коливаються. У США цей показник досягає 43 % від загального обсягу будівництва головних доріг, в Японії – 6 %. Слід зазначити, що у концепції конструкції бетонних покриттів помітні зміни. Якщо у попередні роки таку конструкцію можна було охарактеризувати терміном «коротка плита», то сучасні конструкції покриттів характеризує термін «неперервне армування». На зростання обсягів дорожніх та аеродромних покриттів з «неперервним армуванням» впливають високі експлуатаційні якості останніх. За даними США річні експлуатаційні витрати на утримання дорожніх покриттів складають: для асфальтобетонних покриттів – 2500 дол. США / рік·км, для бетонних – 265 дол. США / рік·км. Про це ж свідчить і досвід експлуатації дорожніх покриттів у Австралії, де застосування попередньо напружених залізобетонних плит дозволяє значно збільшити термін їхньої служби, що з урахуванням інфляції та дисконту вартості нетто в доларах США дає певний економічний ефект.

Попередньо напружене армування на сучасному етапі свого розвитку вимагає розробки низки технічних та технологічних рішень, які пов'язані з анкеруванням арматури, забезпеченням зчеплення арматури в каналах, контроль такого зчеплення. Якісне зчеплення може бути забезпечене тиксотропними розчинами, які легко ін'єктуються.

Таким чином, аналіз матеріалів роботи XIII конгресу FIP свідчить про наявність у світовій науці та техніці широкого спектру напрямків вдосконалення залізобетонних конструкцій та споруд. Головними серед них є розробка та реалізація конструкцій на основі високоміцних бетонів, волокнистої неметалевої арматури та попереднього напруження. В останньому провідну роль відіграє наступне попереднє напруження. В будівництві головних споруд аеропортів – аеродромних покриттів – перспективним вважається перехід на «неперервне армування» залізобетонних плит жорстких покриттів.

Список літератури

1. *Challenges for in the Next Millennium. Proceeding XIII FIP Congress on challenges for concrete in the next millennium /Asterdam/Netherland/23–29 may 1998/ Edited by D. Stoelhorst & G.P.L. den/ Boer / Vol. 1,2. – Rotterdam, A.A. Balkema, 1998. –1074 p.*

Стаття надійшла до редакції 11 листопада 1999 року.