

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА КОНСТРУКЦІЙНОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНУ

У статті розглянуто взаємний вплив пружних та міцнісних властивостей розчинних складових керамзитобетону на його фізико-механічні характеристики.

В статье рассмотрено взаимное влияние упругих и прочностных свойств растворных составляющих керамзитобетона на его физико-механические характеристики.

In the article the aspects of mutual influence of the resilience and cohesion characteristics of the concrete mortar ingredients on its physical and mechanical properties are considered.

Актуальним в наш час є вирішення проблем екології, економіки, конкурентоспроможності продукції, які тісно пов'язані з питаннями енергозбереження. Термічний опір існуючих в Україні огорожувальних конструкцій майже у три рази нижчий, а показники питомої витрати енергії на опалення житла є вищими у порівнянні з європейськими країнами. Підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій як нових, так і існуючих споруд можливе за рахунок використання легких бетонів. За призначенням легкі бетони поділяють на конструкційні та теплоізоляційні. Із різновидів легкого бетону найбільше застосовують керамзитобетон. Відомо, що при зростанні середньої густини міцність керамзитобетону також зростає. Тобто міцність керамзитобетону порівняльна з міцністю важкого бетону. Це дає можливість за необхідності замінити виробу з важкого бетону виробами з керамзитобетону. Такі технологічні рішення особливо сприятливі для підприємств, які випускають і керамзит, і виробу збірного залізобетону. Перед заводською технологією залізобетону стає питання оптимізації структури і удосконалення методів виготовлення виробів із конструкційного керамзитобетону.

Міцність легкого бетону залежить від активності в'язучого, міцнісних і деформаційних характеристик цементного каменя і заповнювачів, концентрації їх в об'ємі матеріалу, якості контактної зони, від форми, характеру поверхні і розмірів частинок заповнювачів [1 – 4].

Проведені дослідження за визначенням міцнісних і пружних характеристик розчину і керамзитобетону (рис. 1, 2).

Аналіз взаємозв'язку між міцнісними і пружними властивостями розчинної частини бето-

ну й самого бетону, показав, що у розчину модуль пружності залежить від того, яка складова в ньому переважає. При співвідношеннях цементу до піску від 1:1 до 1:6 модуль пружності не міняється і складає $10 \cdot 10^3$ МПа. При співвідношенні 3:1 модуль розчину знижується до $5 \cdot 10^3$ МПа. Міцність розчину збільшується із збільшенням кількості в ньому цементу. При співвідношенні Ц:П більше 1:5 приріст міцності розчину складає 0,8...1,0 МПа.

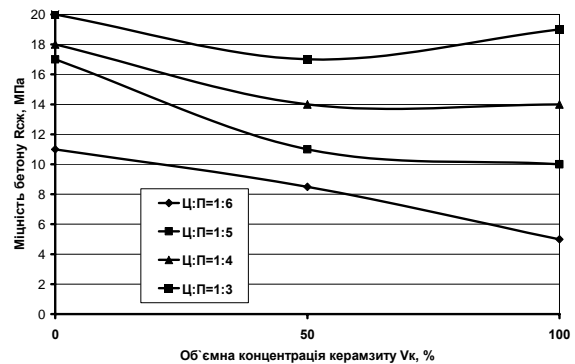


Рис. 1. Залежність міцності бетону від об'ємної концентрації керамзиту

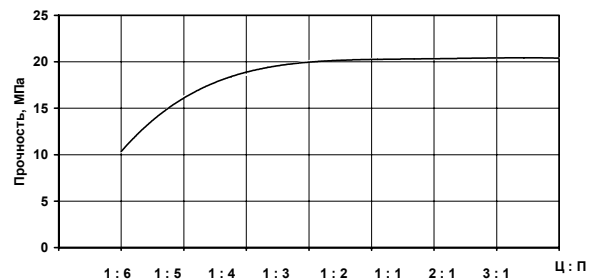


Рис. 2. Залежність міцності розчинної складової від співвідношення витрати цементу до піску

У бетоні при збільшенні вмісту крупного заповнювача збільшення співвідношення між витратою цементу і піску підвищує модуль пружності бетону.

Модуль пружності бетону в значній мірі залежить від заповнення міжзернових порожнеч піску цементним тістом. При повному заповненні міжзернових порожнеч (Ц:П складає більше 1:3) модуль пружності керамзитобетону зростає в 1,5 рази.

Міцність керамзитобетону визначається міцністю розчинної складової, яка залежить від способу ущільнення, кількості і марки цементу. Рациональні значення міцності розчинної складової отримані при співвідношенні Ц:П від 1:3 до 1:2.

Таким чином, марку керамзитобетону при однаковому ступені ущільнення можливо підвищити з 200 до 250 за рахунок збільшення активності цементу або шляхом підвищення міцності керамзиту в 4 рази.

Для підтвердження теоретичних і практичних уявлень про міцність легких бетонів запропоновано безліч формул, які можна розділити на три групи.

Перша група – формули, в яких міцність легкого бетону залежить від міцності властивостей компонентів і їх відносного вмісту (формула Ю. Е. Корниловича):

$$R_6 = R_p(1 - \varphi) + R_k \varphi, \quad (1)$$

де R_p – міцність складової розчину; R_k – міцність крупного пористого заповнювача (керамзиту); φ – об'ємна концентрація крупного заповнювача.

Друга група формул пов'язує міцність бетону з деформаційними властивостями компонентів (формула А. І. Ваганова):

$$R_6 = E_6 \cdot \varepsilon_c = \frac{1}{\mu} \cdot E_6 \cdot \varepsilon_p, \quad (2)$$

де E_6 – модуль деформації бетону у момент руйнування; ε_c – гранична стисливість заповнювача; ε_p – гранична розтяжність заповнювача; μ – коефіцієнт Пуассона.

Третя група формул враховує міцність компонентів, їх об'ємний вміст і деформаційні властивості (формула Б. Г. Скрамтаєва):

$$R_6 = R_p \cdot \left[1 + \left(\frac{E_3}{E_p - 1} \right) \cdot \varphi \right], \quad (3)$$

де E_3 і E_p – відповідно, модулі пружності заповнювача і розчину.

Істотний вплив міцності пористого заповнювача – керамзиту – приводить до меншого відносного впливу на міцність легкого бетону таких чинників як В/Ц і активність цементу.

В цілях економного використання цементу мінімальна міцність керамзитового гравію повинна складати 0,1 від необхідної міцності бетону R_6 . Оптимальну міцність керамзитового гравію призначають в межах (0,1...0,16) R_6 . Завищення міцності керамзиту приведе до збільшення об'ємної маси керамзитобетону, внаслідок чого буде втрачена його головна перевага перед звичайним важким бетоном. На міцність бетону впливає співвідношення модулів пружності керамзиту і розчинної частини. Його оптимальне значення 0,9.

Напружено-деформаційний стан бетону і залежність його зміни від пружних властивостей, об'ємної концентрації і складових дозволяє прогнозувати оптимальну структуру і його властивості. Розв'язувалося завдання вивчення за допомогою методу кінцевих елементів напружено-деформаційного стану бетону. При цьому розглянуто дві двокомпонентні системи в єдиній моделі. Перша з двокомпонентних систем в моделі – це керамзит (включення) і розчин (матриця), а друга – дрібний заповнювач у вигляді піщинки (включення) і цементний камінь (матриця). Такі складні системи дозволяють визначити вплив на напружено-деформаційний стан як пружних властивостей складових, таких як керамзит, розчин, пісок, цементний камінь, так і взаємний вплив їх залежно від розташування, концентрації складових і контактних зон крупного і дрібного заповнювачів з цементним каменем.

Вибрано три варіанти моделей. Кожна модель містить чотири гранули керамзиту і чотири або вісім піщинок. Частина контактної зони гранул керамзиту і піщинок має оболонку (плівку) з цементного каменя. Решта частини моделі зайнята розчином. Оскільки моделі відрізняються кількістю і розташуванням піщинок, то це дозволяє варіювати об'ємну концентрацію керамзиту і товщину плівки цементного каменя. У всіх трьох варіантах піщинки розташовані під гранулою керамзиту щодо навантаження, що дає можливість вивчати зону усередині моделі, включаючи спотворення, можливі у країв. При цьому розглядається і найбільш небезпечна зона з погляду максимальних розтягуючих напруг.

Варійованими факторами були модуль пружності керамзиту E_k , модуль пружності цементного каменя $E_{цк}$, об'ємна концентрація керамзиту V_k , товщина плівки цементного каменя в

зоні найменшої відстані між зернами заповнювача δ . Об'ємна концентрація виражена у вигляді відстані між зернами керамзиту L . Об'ємна концентрація керамзиту і відстань між зернами обернено пропорційні. Фактори, що вивчаються, варіювалися кожен на трьох рівнях. Товщину плівки цементного каменя змінювали в оптимальній області від 0,05 мм до 0,1 мм. Об'ємна концентрація керамзиту на максимальному рівні $V_k = 1000 \text{ л/м}^3$.

Прийняті постійними і рівними модулі пружності розчину $E_p = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ і піску $E_n = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Як величина, що оптимізується, вибраний коефіцієнт концентрації розтягуючих напруг, найбільш небезпечних для бетону.

Моделі розбиті на кінцеві трикутні елементи. Оскільки концентрація напруг очікується на межі розділу фаз, тобто в контактній зоні матриці і включення, в цих зонах було прийнято детальне розбиття на дрібні елементи. Детально вивчався напружено-деформаційний стан в області моделі, де виділені піщинки, плівка цементного каменя навколо них і гранули керамзиту. Аналіз виконаний по максимальних коефіцієнтах концентрації розтягуючих напруг для другої двокомпонентної системи, що виникають в плівці цементного каменя біля зерна піску.

Виконаний статистичний аналіз і одержана залежність максимального коефіцієнта концентрації розтягуючих напруг η_y від модуля пружності керамзиту E_k , модуля пружності цементного каменя $E_{цк}$, товщини плівки цементного каменя δ і об'ємної концентрації керамзиту V_k у вигляді полінома другого ступеня.

У вивчених межах варіювання факторів найсильніше на напружено-деформаційний стан бетону робить вплив об'ємна концентрація керамзиту. При збільшенні його концентрації від $L = 0,2 \text{ см}$ і $V_k = 760 \text{ л/м}^3$ до $L = 0,0 \text{ см}$ і $V_k = 1000 \text{ л/м}^3$ коефіцієнт концентрації напруг знижується від 1,4 до 0,3, тобто приблизно в 5 разів.

Друге місце по силі впливу займає модуль пружності керамзиту. Найсильніше знижується коефіцієнт концентрації при збільшенні модуля пружності E_k від $0,5 \cdot 10^3$ до $2,75 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

До особливостей легкобетонних сумішей, як відомо, відносять швидку розшарованість при додатку до них вібраційної дії. При відробітку нової, низькочастотної технології формування бетонних сумішей, необхідно встановити межі

параметрів вібрації залежно від легкоукладальності бетонної суміші, при яких суміш не розшаровується.

У якості характеристик легкоукладальності прийняті осідання конуса і вібров'язкість. Для визначення принципу відповідності в системі «режим-склад» з метою встановлення меж вібраційної дії, при яких суміш в процесі формування не розшаровується, проводили натурний експеримент. У ньому легкоукладальність варіювалася витратою цементного тіста при постійному водоцементному відношенні. Режим формування приймався низькочастотний з частотою 15 Гц, симетричний. Експеримент виконаний за планом 2^3 , тобто мав три змінних чинника на трьох рівнях. Межі варіювання в кодівих і натуральних значеннях змінних представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Межі варіювання чинників експерименту

Коди рівнів	Натуральні значення чинників		
	витрата цементу $\rho(x_1)$, кг/м ³	прискорення $A(x_2)$	час формування $t(x_3)$, с
Нижній (-I)	250	1,5	10
Середній (0)	300	2,5	40
Верхній (+I)	350	3,5	70

Для кожної порції керамзитобетонної суміші відповідно до плану експерименту визначалася її удобоукладальність стандартним конусом. Потім замірялася вібров'язкість суміші для кожного запланованого варіанту складу і режиму.

Наявність розшарування і його величину встановлювали при формуванні бетонної суміші в текстолітовій формі з розмірами 15 x 15 x 30 см. При цьому через кожні дві години після формування по заданому режиму бічну стінку форми видаляли, відкриту поверхню відформованого бетону промивали водою до оголення гранул керамзиту. Заміряли загальну висоту шару бетону h і товщину шару розчину, що осів у дна Δh .

Як показник розшарування (величини, що оптимізується) використовували відношення $\frac{\Delta h}{h}$. Прийнятий відлік наявності розшарування при $\frac{\Delta h}{h} = 0,02$ і більш, оскільки до цієї межі він не змінює міцність керамзитобетону.

Виконана статистична обробка результатів і одержаний поліном другого ступеня:

$$y\left(\frac{\Delta h}{h}\right) = 0,047 - 0,015x_1 + 0,026x_2 + \\ + 0,026x_3 + 0,011x_1^2 - 0,09x_1x_2 - \\ - 0,009x_1x_3 - 0,27x_2^2 + 0,019x_2x_3 - 0,015x_3^2.$$

Середньоквадратичне відхилення експериментальних результатів від теоретичних складає $S = 0,0064$, кореляційне відношення – $0,802$.

На підставі одержаного полінома побудовано дві залежності. Із залежності вібрів'язкості від прискорення вібрації (рис. 3) видно, що для вібраційного розрідження рухомих і особливо литих сумішей прискорення від 2 до 5 є достатнім.

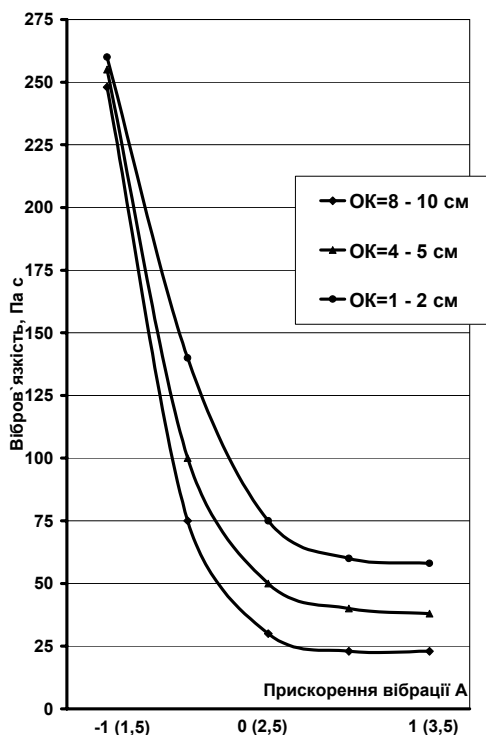


Рис. 3. Залежність вібрів'язкості від прискорення вібрації

Друга залежність є номограмою відповідності в системі «режим – склад» для отримання відформованого бетону, що не розшарується (рис. 4).

Криві номограми відповідають визначеній вібрів'язкості керамзитобетонної суміші, яка залежить як від складу, так і від режиму вібраційної дії. Номограма має загальний характер за показником вібрів'язкості, і нею можна користуватися у межах величини вібрів'язкості, одержаної при будь-яких поєднаннях складу суміші і прискорення вібраційної дії. На номограмі виділено режими, які не розшаровують і розшаровують керамзитобетонну суміш. При-

клад призначення режиму показаний для бетонної суміші з ОК = 6 см. Суміш можна формувати режимом, який дозволяє одержати вібрів'язкість $\eta = 40 \text{ Па} \cdot \text{с}$ на протязі не більше 45 с або $\eta = 50 \text{ Па} \cdot \text{с}$ на протязі не більше 55 с.

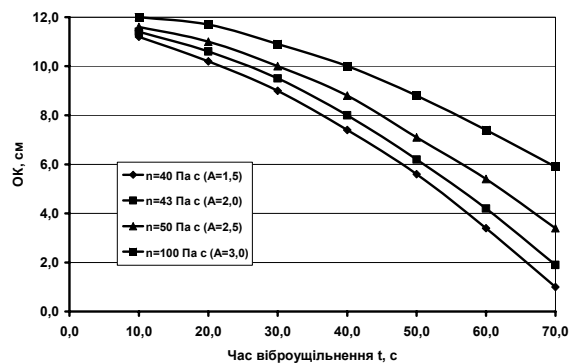


Рис. 4. Номограма відповідності в системі «режим – склад» для отримання керамзитобетону, що не розшарується

Таким чином, при низькочастотних і інших режимах вібраційної дії, відмінних від стандартних, здатність до формування керамзитобетонної суміші доцільно оцінювати за величиною її вібрів'язкості, яка є комплексною характеристикою, що відображає режим вібрації і склад бетону. Залежно від вібрів'язкості необхідно обмежувати час формування з тим, щоб не допускати розшарування. З одержаних в результаті досліджень даних виходить, що при формуванні малорухливих сумішей (ОК = 1...3 см; $\eta = 40...50 \text{ Па} \cdot \text{с}$) час формування не повинен перевищувати 60...70 с; при формуванні рухомих сумішей (ОК = 3...15 см; $\eta = 40...100 \text{ Па} \cdot \text{с}$) – 10...60 с.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дворкин, Л. И. Основы бетоноведения [Текст] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – СПб.: ООО «Стройбетон», 2006. – 692 с.
2. Ребиндер, П. А. Поверхностно-активные вещества [Текст] / П. А. Ребиндер. – М.: Знание, 1961. – 46 с.
3. Ершов, Л. Д. Высокопрочные и быстротвердеющие цементы [Текст] / Л. Д. Ершов. – Изд-во «Будивельник», 1975. – 161 с.
4. Бизов, В. Ф. Відкриті гірничі роботи. Том XIII [Текст] : підр. для студ. ВНЗ за напрямком «Гірництво» / В. Ф. Бизов, А. Ю. Дриженко. – Кривий Ріг: Мінерал, 2004. – 341 с.

Надійшла до редколегії 10.03.2010.
Прийнята до друку 12.03.2010.