

УДК 693.546.5.001.24

І.В.Вельган

**Національний університет "Львівська політехніка"
ОСОБЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
КРУПНОПОРИСТИХ БЕТОНІВ**

В статті розглянута структура крупно пористого дренажного бетону, моделі упаковки зерен матеріалів і обґрунтована оптимальна структура бетону. Розглянуті питання структуроутворення, властивості контактної зони «цементний камінь-заповнювач», та питання адгезії між компонентами бетону. Визначено вплив компонентів бетону, способів ущільнення бетонної суміші на покращення фізико – механічних характеристик бетону. Наведено рекомендації з технології виготовлення вібропресованих крупно пористих бетонів.

Ключові слова: крупнопористий цементобетон; контактна зона, адгезія компонентів, структура, властивості, фільтрація.

Рис 8. Форм 14. Літ 11

И.В.Вельган

В статье рассмотрена структура крупнопористого дренажного бетона, модели упаковки зерен материалов и обоснована оптимальная структура бетона. Рассмотрены вопросы структурообразования, свойства контактной зоны «цементный камень - заполнитель», и вопросы адгезии между компонентами бетона. Определено влияние компонентов бетона, способов уплотнения бетонной смеси на улучшение физико - механических характеристик бетона. Приведены рекомендации по технологии изготовления вибропресованных крупно ячеистых бетонов.

Ключевые слова: крупнопористых цементобетон; контактная зона, адгезия компонентов, структура, свойства, фильтрация.

I.Velhan

**FEATURES OF THE PROPERTIES AND MANUFACTURING TECHNIQUES LARGE
DRAINING POROUS CONCRETE**

In this article the structure of large-porous concrete and model of materials and grains packaging are considered, optimal structure of concrete is proved. The problems of structure formation, properties of contact area "cement stone filler" and adhesion between the components of the concrete are examined. The influence of concrete component and methods of concrete mixture consolidation on improvement of physical and mechanical characteristics of concrete is defined. The recommendations concerning the production technology of vibrocompressed large-porous concrete are shown.

Keywords: large-porous cement-concrete, contact area, adhesion of components, structure, properties, filtering.

Постановка проблеми.

Термін " крупнопористий бетон" міцно ввійшов у бетонознавство після появи в 1955 р. праці проф. Б.Г. Скрамтаєва " Крупнопористий бетон і його застосування в будівництві" , в якому дано історичний огляд ідеї крупнопористого бетону і його застосування головним чином як стінового матеріалу [10] . Часто в літературі великопористий бетон називають " безпечаний " , оскільки в його складі відсутній невеликий заповнювач . Застосування КПБ при будівництві будівель було розпочато в 1950 р. за пропозицією Б.Г. Скрамтаєва , інж. Н.С. Попова і Н.М. Орлянкін .

Другий напрямок застосування КПБ пов'язано з його високою проникністю , тобто здатністю легко пропускати через свою товщу рідини. Ця властивість вперше було використано в США , де з 1925 р. було організовано серійне виробництво дренажних труб з КПБ .

У подальшому область застосування КПБ як фільтруючого матеріалу розширилася і він був успішно впроваджений в конструкціях водоочисних споруд для дренажу повільних фільтрів першого ступеня [3], в транспортному будівництві для влаштування придорожніх дренажів [2], також для кріплення укосів земляних споруд ГЕС в зоні виходу фільтраційних вод [7], у меліоративному будівництві.

Крупнопористий бетон відрізняється від щільного порівняно низькою міцністю , що не дозволяє застосовувати його в тих конструктивних рішеннях , де високі теплозахисні або дренажні властивості повинні поєднуватися з конструктивними .

Аналіз основних досліджень та публікацій.

При дії вібрації бетонна суміш звичайного бетону тиксотропно розріджується і набуває властивості важкої рідини. В'язкість цементної пасти зменшується , частки крупного заповнювача набувають здатність переміщатися і ущільнюватися.

Реологічні властивості крупнозернистої бетонної суміші визначаються її в'язкістю, наявністю внутрішнього тертя і зчеплення частинок між собою. Вибір оптимального водоцементного відношення за даними [4], є основною проблемою технології приготування КПБ . На залежність міцності КПБ від В / Ц вказували Б.Г. Скрамтаєв і М.П. Елінзон [9]. Для кожного складу КПБ існує оптимальне значення В / Ц , відхилення від якого неприпустимо. Вказувалося на те, що " відхилення від оптимального В / Ц знижують міцність крупнопористого бетону більшою мірою , ніж у звичайного бетону " [11] .

Проведені раніше дослідження технологічних особливостей способів ущільнення бетонної суміші з віджимання води показали, що для ущільнення бетонної суміші під тиском необхідно щоб відбулася рівномірна компресія цементного гелю, обумовлена відтискуванням рідкої фази . Такий процес можна організувати, якщо попередньо надати бетонної суміші задану форму і забезпечити рівномірну передачу на неї нормального тиску. Був зроблений висновок, що пресуванню має передувати віброформування бетонної суміші і віброущільнення цементного гелю, що знаходиться між зернами заповнювача[1].

Досвід показує, що на одному і тому ж цементі і на одних і тих же заповнювачах можна у певних умовах отримувати бетони відносно більш міцні, хоча й трохи менш щільні, якщо забезпечити кращий контакт між зернами заповнювача.

Невирішені раніше частини загальної проблеми

Відомо , що основним критерієм високої якості бетону майже всіма дослідниками визнається його щільність, однак , як зазначав ще Р. Лерміт [6] , це положення може бути предметом обговорення.

Досвід показує , що на одному і тому ж цементі і на одних і тих же заповнювачах можна у відомих умовах отримати бетони відносно більш міцні , хоча й трохи менш щільні , якщо забезпечити кращий контакт між зернами - заповнювачами .

При дослідженні властивостей важкого бетону на фракціонованому заповнювачі встановлено, що при певному змісті заповнювача і відповідних фракцій утворилася не послідовне зниження міцності , в результаті збільшення вмісту заповнювача , а його підвищення . Якщо зіставити пружні характеристики такого бетону і бетону на нефракціоновані заповнювачі , то можна побачити , що вони суттєво відрізняються.

Враховуючи те, що заповнювач навряд чи змінює свої пружні характеристики , залишається припустити , що в бетоні на фракціонованому заповнювачі збільшуються пружні характеристики матриці , що знаходиться в інших умовах (тонкі плівки), ніж при випробуванні чистого цементного каменю у великому обсязі.

Таким чином , в роботі висувається наступна наукова гіпотеза . При формуванні структури крупнопористого бетону на фракціонованих заповнювачах при дії вібропресуючого навантаження, в результаті зближення частинок заповнювача покритих шаром цементного тіста, в зоні їх контакту утворюються тонкі плівки цементного каменю, що за характеристиками різко відрізняються від характеристик цементного каменю при звичайному вібруванні бетону. Використовуючи це положення, можна отримати на основі жорстких бетонних сумішей з оптимальним В / Ц і підібраному гранскладі конструкційний великопористий бетон з міцністю більше 20 МПа.

Мета досліджень

Метою роботи є вивчити структуроутворення і основні властивості КПБ , виготовленого методом вібропресування для дренажних дорожніх покриттів. Аналіз існуючих моделей упаковки зернистих матеріалів і теоретично обґрунтувати оптимальну структуру крупнопористого дренажного бетону. Необхідно підібрати і оптимізувати склади бетону з мінімальною В / Ц стосовно до технології вібропресування. Крім цього особливу актуальність мають питання структуроутворення і основні фізико - механічні властивості вібропресованого КПБ . Необхідно намітити подальші шляхи підвищення фізико- механічних та інших властивостей розроблених складів КПБ .

Дренажних цементобетон в дорожньому будівництві почав застосовуватися на початку 80 -х років у США , Канаді , Франції , Нідерландах для влаштування покриттів міських вулиць і автомагістралей , а також підстав в якості водонепроникної конструктивного шару. Такі покриття дозволяють частково або повністю видалити воду з проїжджої частини , тротуарів і площ , зменшуючи на них товщину водної плівки і підвищуючи безпеку руху. Ці покриття мають наступні переваги: водонепроникність, дренажну здатність , зменшують водяний туман за

рухомими транспортними засобами, а також шум при їх русі. Вони здатні утримувати шар води товщиною до 2,5 см, яка випаровується, або відводиться в фільтруючий шар і систему внутрішнього водовідводу, якщо дренажних бетон використаний на всю товщину покриття.

Основні результати досліджень

Одним із шляхів до вдосконалення фізичних уявлень про міцність бетону можуть служити модельні уявлення, що дозволяють простежити кінетику деформування і руйнування бетону.

Мінеральні наповнювачі для бетонів неоднорідні за розмірами і формою зерен. Максимально щільна їх упаковка є однією з найважливіших технологічних завдань, що визначають міцність бетону під дією зовнішніх навантажень.

Були розглянуті дві схеми укладання рівних кіл на площині і в просторі. Найщільніша з таких укладок виходить таким чином: на площині за схемою (рис. 1 б) укладаються рівні круги, що є "екваторіальними колами" рівних куль, в якому кожен куля торкається шести сусідніх. Якщо продовжувати накладати таким же чином подібні шари куль зверху і знизу від уже наявних, то отримаємо заповнення всього простору рівними кулями, де кожен куля торкається 12 сусідніх. Оскільки кожен шар можна накласти на вже наявний двома способами, то фактично виходить нескінченно багато різних систем заповнень простору рівними кулями;

проте всі ці укладання куль мають однакову щільність, рівну $\frac{\pi\sqrt{2}}{6} \approx 74,05\%$ [54].

Акад. Н.В.Белов показав, що при кубічній укладці куль однакового діаметра утворюються октаедричні порожнини, а при ромбоєдричній - тетраєдричні за типом геометричних фігур, утворених кулями навколо відповідної "дірки" (рис. 2 а, б). Для випадку нескінченної укладання куль можна розрахувати кількість порожнеч кожного типу, що припадають в середньому на одну кулю.

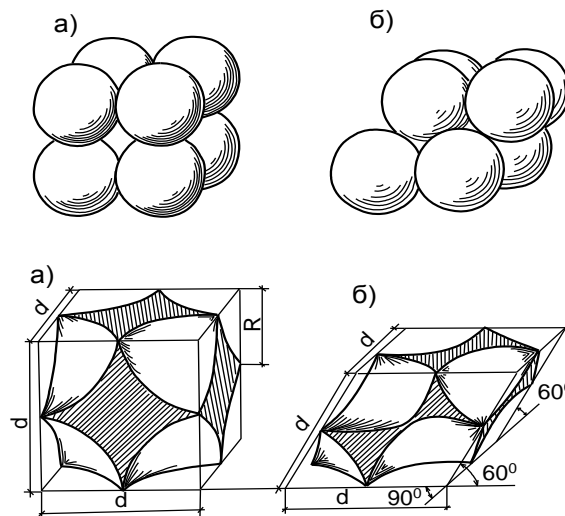


Рис. 1. Розміри і геометрична форма порожнеч, утворених в результаті кубічної (а) і ромбоєдричної (б) укладання куль (по Н.В. Белову) [116]

Щільність упаковки дотичних куль однакового діаметра коефіцієнт заповнення обсягу визначається за формулою

$$D_m = \frac{\pi}{6(1 - \cos\theta)\sqrt{1 + 2\cos\theta}} \quad (1)$$

Згідно (1) щільність розташування куль одного діаметра характеризується кутом, утвореним гранями ромбоєдра і залежно від взаємного розташування куль може змінюватися від 60 (ромбоєдрична або гексогональна укладка) до 90° (кубічна укладка). Залежно від цього щільність упаковки буде мати значення від 0,741 до 0,524, а порожнистість, що обчислюється як

$$m_n = 1 - D_m, \quad (2)$$

при зазначених крайніх значеннях θ може змінюватися в межах:

$$0,2595 < m_n < 0,4764.$$

Для складання моделі були прийняті наступні вихідні положення :

- максимальна щільність упаковки залежить від геометричних розмірів і форми зерен;
- радіус зерна в заданому напрямку є випадкова величина, описувана деякою функцією розподілу, яка визначається експериментально, що дозволяє враховувати будь-яку форму зерна;
- функція розподілу середніх радіусів зерен прийнята по рівномірному або нормальному законам розподілу;
- число ітерацій елементів упаковки визначається за допустимої відносної похибки

$$\alpha \approx \frac{1}{\sqrt{n}}.$$

Для вивчення найбільш щільної упаковки були розглянуті чотири взаємно дотичні зерна; відрізки, що з'єднують їх центри утворюють неправильну трикутну піраміду (рис. 2).

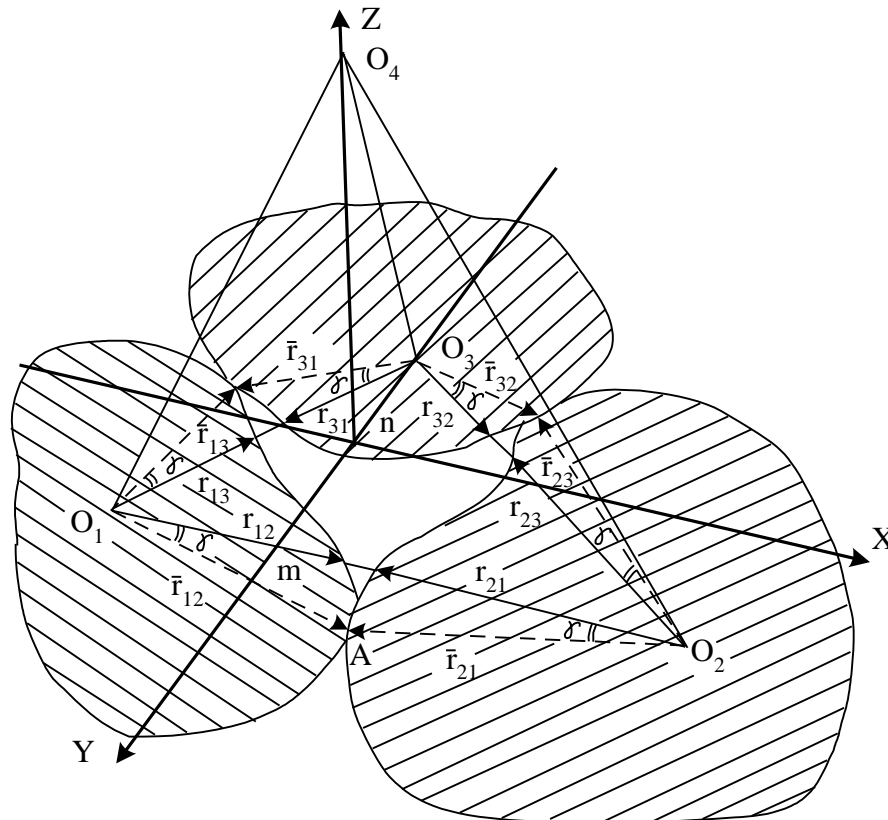


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення максимально щільної упаковки мінеральних зерен

Декартова система координат (вісь X) була обрана паралельно лінії O_1O_2 . На кожній ітерації генерувалися радіуси зерен в різних напрямках і розраховувалися відстані між центрами по трьох осях координат O_1O_2 , O_3m , O_4n . Потім обчислювалися середні значення цих відстаней по всій вибірці: $(O_1O_2)_{cp}$, $(O_3m)_{cp}$, $(O_4n)_{cp}$. Кількість зерен що вміщуються в одиниці об'єму, знаходилося за формулою

$$N = \frac{1}{(O_1O_2)_{cp} (O_3m)_{cp} (O_4n)_{cp}}. \quad (3)$$

Віддаль O_1O_2 отримано з виразу

$$O_1O_2 = r_{12} + r_{21}, \quad (4)$$

де

r_{12} - радіус першого зерна в напрямку центра другого;

r_{21} - радіус другого зерна в напрямку першого.

Віддаль O_3m було знайдено из трикутника $O_1O_2O_3$:

$$O_3m = \sqrt{(r_{13} + r_{31})^2 - \left[\frac{(r_{32} - r_{23})^2 + (r_{12} + r_{21})^2 + (r_{13} + r_{31})^2}{2(r_{12} + r_{21})} \right]^2}. \quad (5)$$

Вираз для O_4n отримано в неявному вигляді і для спрощення розрахунку було прийнято співвідношення

$$O_4n = \frac{2\sqrt{2}}{3} O_3m, \quad (6)$$

справедливе для упаковки рівних куль з неоднорідних зерен. Як показали розрахунки, що виникає при такому спрощенні помилка прагнути до 0 при збільшенні числа ітерацій n . З розрахункової схеми (рис. 2) видно, що вирази (4) і (5) будуть давати систематичну помилку за рахунок того, що зіткнення зазвичай має місце не по лінії, що з'єднує центри зерен. Для компенсації цієї помилки задавалися деяким кутом γ .

Упаковка характеризується вмістом твердих зерен в частках одиниці об'єму. Для визначення максимально щільної теоретичної упаковки за обсягом необхідно знайти, за формулою (3.1) число куль в одиниці об'єму, а по (3.7) і (3.8) - середній обсяг однієї кулі, тоді загальний обсяг твердої фази в одиниці об'єму становитиме:

$$P = NV_{cp}. \quad (7)$$

Аналогічно знаходиться суммарная площа поверхні зерен в одиниці об'єму:

$$S = NS_{cp}, \quad (8)$$

де,

V_{cp} и S_{cp} - средние значения объема и поверхности одного зерна в выборке;
 N - число шаров в единице объема.

На рис. 2 також можна Побачити, що на кожній ітерації розглядалися чотири радіусу кожного зерна, тому

$$V_{13} = \frac{3}{4} \pi (r_{12}^3 + r_{13}^3 + \bar{r}_{12}^3 + \bar{r}_{13}^3). \quad (9)$$

Аналогічные расчеты были проведены для 2 и 3, 1 и 2 зерна, а затем рассчитано среднее значение объема зерна по формуле:

$$V_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{1i} + V_{2i} + V_{3i})}{3n}. \quad (10)$$

Потім порядок розрахунків був повторений для обчислення S_{cp} .

На основі розробленої моделі був складений алгоритм розрахунку. Розрахункова залежність щільності упаковки від однорідності частинок за розмірами і формою (крива 1) і часу вібрування показана на графіку (рис.3) з якого видно, що збільшення неоднорідності матеріалу за розмірами (зменшення величини) супроводжується підвищенням щільності упаковки.

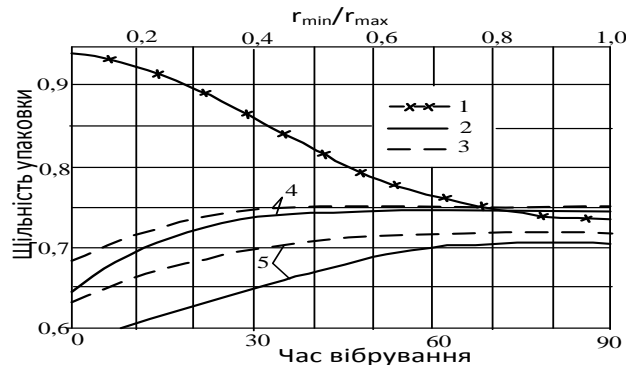


Рис.3. Залежність щільності упаковки від однорідності зерен за розмірами і формою (1) і часу вібрування; для керамзиту (2) та щебеню (3); 4 і 5 - верхні та нижні межі розподілу експериментальних даних

Отримувані розрахунком значення щільної упаковки за обсягом зернистих середовищ, є максимально можливими. Відношення фактичної максимально щільної упаковки за обсягом, визначеної дослідним шляхом, до максимальної отриманої теоретично за запропонованою моделі, автори назвали коефіцієнтом ущільнення, який завжди менше одиниці.

При розгляді контакту між зернами заповнювача Ю.Л. Воробйов не врахував потовщення шару цементного тіста в контактній зоні, а відстань між суміжними зернами прийняв рівним товщині огортаючого шару цементного тесту. Тим часом потовщення цього шару в зоні контакту є дуже важливим фактором формування міцності крупнопористого бетону.

Був зроблений висновок, що при зближенні зерен заповнювача в процесі укладання бетону обволікаючий їх шар цементного тесту витісняється з місця зіткнення і утворює в зоні контакту кільцеве потовщення зразок меніска.

На підставі такого подання С.М. Ицкович [5] запропонував структурну модель крупнопористого бетону у вигляді сукупності однорозмірних сферичних зерен радіусом R , дотичних між собою і рівномірно покритих шаром цементного тіста товщиною δ з контактними кільцевими потовщеннями (рис. 7). Радіус утворюється між зернами кругового контакту r можна виразити через R і δ на підставі балансу обсягу цементного тесту до і після зіткнення зерен. Об'єм цементного тесту в контактній зоні, примыкающей к одному из зерен, т.е. об'єм тела вращения (область заштрихованная на рис.3.7б) равен

$$V = \pi \int_0^{R-\sqrt{R^2-r^2}} (r^2 + x^2 + 2xR) dx. \quad (11)$$

До соприкосновения зерен тот же об'єм цементного тесту был распределен слоем δ на поверхности шарового сегмента с диаметром основания $2r$.

Следовательно,

$$V = 2\pi R \delta (R - \sqrt{R^2 - r^2}) \quad (12)$$

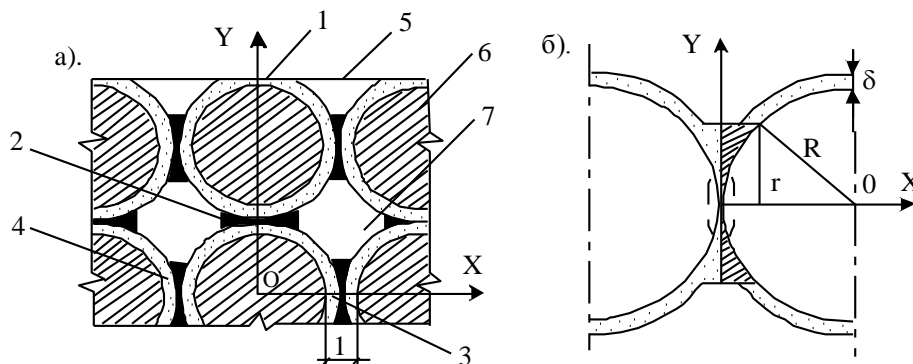


Рис.7. Елементарна комірка моделі крупнопористого бетону (а);

Схема контакту, що утворюється при зближенні зерен заповнювача з шаром цементного тесту, що його окутує (б):

- 1 - цементний камінь контактної зони;
- 2 - цементна оболочка;
- 3 - зерно мінерального заповнювача;
- 4 - повітряна міжзернова пора

Прирівнявши обидва вирази і шляхом перетворень, середній діаметр контакту становить

$$\frac{d}{D} = \sqrt{0,375 + 6 \frac{\delta}{D} \sqrt{0,14 - 1,5 \frac{\delta}{D}}}, \quad (13)$$

де

$$d = 2r; D = 2R.$$

Структурний параметр $\left(\frac{d}{D}\right)^2$, що виражає відносну площу контактної перетину, був

покладений в основу формули міцності КПБ.

При розгляді структури вібропресованого КПБ представляється доцільним розрізняти такі елементи:

- Цементний камінь, властивості якого формуються під впливом часу та умов формувань і подальшого твердіння;
- Мінеральний заповнювач, властивості якого практично не змінюються з плином часу;
- Зону контакту між цементним каменем і заповнювачем, властивості якої залежать від властивостей перших двох елементів структури.

Зона контакту, що складається з контактної оболонки цементного каменю, контактної оболонки заповнювача і поверхні розділу, є найбільш слабким місцем структури бетону. При вібропресуванні бетонної суміші, коли відстані між зернами заповнювача зводяться до мінімуму, роль контактних шарів в структурній міцності бетону значно зростає.

Міцність контактної зони КПБ буде залежати від товщини і властивостей структурованої оболонки в місцях контакту між зернами заповнювача. Міцність і щільність цієї оболонки буде зменшуватися в міру віддалення від поверхні зерна і досягає мінімуму в зоні переходу у вільний обсяг цементного каменю.

Дослідження проводили на зразках КПБ, виготовлені за і вібропресованою технологією на трьох видах заповнювачів і мінеральних тонкодисперсних домішок. Розмір фракції заповнювачів становив 2-10 мм.

Аналіз результатів вимірювання мікротвердості показує, що середня мікротвердість основної фази цементного каменю контактної зони вібропресованого бетону в 2 рази вище, ніж у вібрувати аналогічного складу. При цьому відстань між зернами заповнювача в результаті пресуючого тиску зменшилася в 4-8 разів залежно від розташування контактної оболонки по відношенню до вібрації.

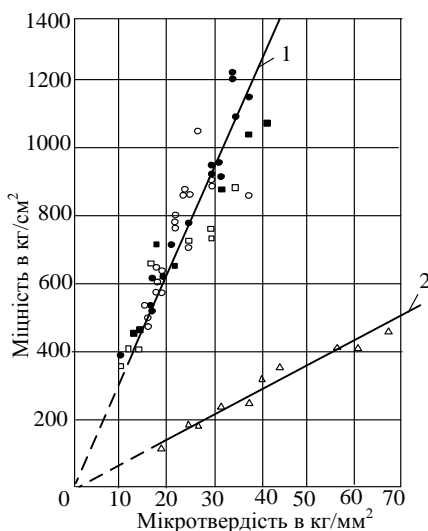
Мікротвердість в зоні контакту заповнювачів значно вище, ніж мікротвердість цементного каменю недеформованою оболонки. Значення мікротвердості у верхній і нижній зонах контактних ділянок між зернами заповнювача в віброваних зразках відрізняються від вібропресованих.

Якщо в вібропресованих різниці практично не встановлено, то в віброваних величина мікротвердості на 30-40% нижче. Це пояснюється принциповою відмінністю в умовах формування контактної зони.

Дослідження показали, що аналогія в зміні мікротвердості і міцності цементного каменю із зміною В/Ц, віку зразків і тонкості помелу цементу дозволила встановити лінійну залежність між двома цими величинами (рис. 8), що має вигляд

$$R = k \cdot H_{\mu} \quad (14)$$

Значення коефіцієнта, k , може істотно змінюватися при введенні до складу цементу різних тонкомолотих генеральних домішок. Для чистих портландцементів різного складу тонкості помелу при однакових умовах зберігання і випробувань зразків значення коефіцієнта



k рекомендується приймати постійним незалежно від віку зразків. ○ - портландцемент з питомою поверхнею 2200 см²/г;

● - то же, 4250 см²/г;

□ - то же, 3800 см²/г;

■ - то же, 4800 см²/г;

△ - пуццолановий цемент с питомою поверхнею 3500 см²/г

Рис.8. Співвідношення між міцністю при стисненні і мікротвердістю для зразків цементного каменю різного віку з цементів різного мінералогічного складу і різної тонкості помелу (В / Ц змінюється від нормальної густоти до 0,4): 1 - портландцементи лабораторного помелу;

2 - пуццолановий цемент заводського помелу

Висновки:

✓ Крупнопористий бетон відрізняється від щільного відсутністю дрібного заповнювача та значною пористістю (до 25%);

✓ Дослідження дають змогу використовувати крупно пористий вібропресований бетон як верхні несучі шари дорожнього одягу;

✓ Дослідження мікротвердості контактної зони вібропресованого крупнопористого цементобетону доводить, що міцність при вібропресованій технології значно перевищує міцність контактної зони при віброущільненні

✓ Підвищення міцності цементного каменю досягається шляхом збільшення питомої поверхні цементу, зменшення В/Ц відношення .

1. Ахвертов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464с.
2. Бакерян А.Ш., Чельшев А.К. Дренажи из трубофильтров //Жилищное строительство. – 1971. - №5
3. Владыченко Г.П. Исследование пористого бетона как материала для дренажа медленных фильтров и скоростных фильтров первой степени при безреагентной очистке воды: Автореф. Дис. Канд.техн. наук: 05.23.05/Одесса, 1967.
4. Горчаков Г.И., Иванов И.А. О комплексной характеристике структуры бетона// Бетон и железобетон. – 1980. - № 1.- С. 22.
5. Ицкович С.М. Вариант моделирования микробетона // Изв. Вузов. Строительство и архитектура, 1986. - №8. – С.50-54.
6. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. – М.: Госстройиздат, 1959.
7. Макаров В.Б. Сборные крепления откосов земляных сооружений //Гидротехническое строительство. - 1960. - №11
8. Потуроев В. В. Полимербетоны. М.: Стройиздат, 1987. 286с.
9. Скрамтаев Б.Г., Элинзон М.П. Легкие бетоны. Из зарубежного опыта производства строительных материалов. – М.: Промстройиздат, 1956.
10. Скрамтаев Б.Г. Крупнопористый бетон и его применение в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1955.
11. Инструкция по приготовлению и применению крупнопористого бетона. СН 60-59. – М.:Госстрой, 1959.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2014.