

## **ТРУБОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ, ЗМІЦНЕНІ ПОЗДОВЖНІМ ПОПЕРЕДНІМ ОБТИСКОМ**

*Запропоновано нову технологію виготовлення трубобетонних конструкцій, що дозволяє зміцнити поздовжнім обтиском бетонне ядро й отримати надміцні конструкції.*

**Ключові слова:** *трубобетон, поздовжній обтиск, бетонна суміш, міцність.*

**Вступ.** До найбільш міцних і ефективних будівельних конструкцій по праву відносять трубобетонні. Відомо, що міцність таких конструкцій, особливо колон, значною мірою визначається міцністю бетонного ядра. Серед способів зміцнення ядра, поліпшення його сумісної роботи з металевою трубою є обтиск або тривале пресування бетонної суміші. Такий захід дозволяє видалити з бетону надлишок води, частину внутрішнього повітря і домогтися щільної упаковки інертних заповнювачів, поліпшити адгезію й когезію та забезпечити ефективну сумісну роботу бетону зі сталеву трубою.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Відомі методи створення обтиску – тривалого пресування виробів з наступним зняттям опалубної форми [1, 2, 4–9]. У разі виготовлення трубобетонних елементів технологія спрощується, трудовитрати зменшуються, повністю або частково відпадає необхідність у розбиранні форм, а тверднення у замкненому просторі надає додаткові можливості для підвищення міцності трубобетонних конструкцій.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** На практиці виникає проблема вибору поперечного або поздовжнього тривалого пресування бетону ядра конструкції. Якщо використовувати силові установки на основі домкратів, пресів для поперечного пресування, то через значну поперечну площу виробу та ще й велику її довжину важко здійснити якісний обтиск. Необхідна сила для пресування може досягати тисяч тонн. Пресування за допомогою сердечника складне, особливо тривале і вимагає спеціального додаткового обладнання. При цьому видалення сердечника з тіла ядра трубобетону, який набрав уже достатню міцність, являє складність.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення нової ефективної технології створення тривалого обтиску бетонного ядра для зміцнення трубобетонних конструкцій і виведення залежностей напружено-деформованого стану.

**Основний матеріал і результати.** Застосування розробленої автором технології, включно з розробленням «живих» рухомих металевих форм, дає можливість вирішити питання створення високоміцних трубобетонних конструктивних елементів.

З практики ущільнення як ґрунтів, так і бетонних сумішей відомо, що якісно можна ущільнити їх на товщину 30–50 см, а далі через тертя ущільнення зменшується і зводиться нанівець. Спроби ущільнити, наприклад, залізобетонні палі рухомим плунжером на торці замкненої форми підтвердили [1], що ущільнення відбувається на торцях, а далі навантаження пресування передається на стінки опалубки і подальше ущільнення пресуванням виявляється практично неможливим. Цьому сприяє утворення із крупного заповнювача каркасів, склепінь, пробок у зонах, близьких до прикладання тиску до бетонної суміші.

Для подолання цього недоліку автор уперше запропонував розділити форму на окремі секції поперечними деформаційними швами. У цьому разі, не маючи поздовжньої жорсткості, форма не може сприймати поздовжнє зусилля обтиску і воно передається на бетонну суміш. При цьому отримані дані, які свідчать, що поперечна радіальна складова тиску залежно від складу суміші що діє на форму може бути межах 15–25 %. У першу чергу це залежить від кількості води в суміші яка, як відомо, може вважатися матеріалом, що не стискається за звичайних виробничих умов будівництва.

Для поступового видалення надлишку води з бетонної суміші в процесі пресування форма повинна мати спеціальні отвори, нещільності, фільтри. При пресуванні завжди слід урахувувати можливість водовідведення. Кількість отворів і їх діаметр у формі призначаються з умов недопущення утворення «магістральних» каналів, втрати цементного в'язучого. Швидкість поздовжнього стискання не повинна бути занадто високою, аби не допустити значного радіального навантаження на форму через недостатню її фільтраційну можливість для води.

Колони у разі роботи на стиск з малим ексцентриситетом можна виготовляти без попереднього напруження. У випадку більших ексцентриситетів – з попереднім напруженням. Серед можливостей реалізації обтиску автором розроблено і впроваджено у практику застосування попередньо напруженої арматури з натягом її на бетонну суміш (див. рис. 1).

Така технологія досліджена і перевірена на науково-технічній базі НДІБК м. Київ та на практиці при будівництві масового переходу через р. Дніпро в м. Дніпродзержинськ [7].

**Напружено-деформований стан трубобетонних елементів круглого перерізу.** У практиці будівництва досить поширені елементи круглого перерізу, серед яких колони, стояки опор, труби. Розглянемо аналітичне вирішення рівнянь напружено-деформованого стану нормальних перерізів циліндричних елементів у межах відомих передумов [3].

Рівняння напружено-деформованого стану для будь-якого перерізу мають вигляд:

$$N = \int_A \sigma_b dA + \sum \sigma_{si} A_{si}; \quad (1)$$

$$Ne_0 = \int_A \sigma_b h dA + \sum \sigma_{si} A_{si} h_{si}, \quad (2)$$

де  $\sigma_b$  – нормальні напруження на елементарній площині  $dA$ , яка знаходиться на відстані  $h$  від крайньої стисненої фібри;  $\sigma_{si}$ ,  $A_{si}$ , та  $h_{si}$  – нормальні напруги, площа і відстань до крайньої стисненої фібри перерізу  $i$ -тої ділянки сталі.

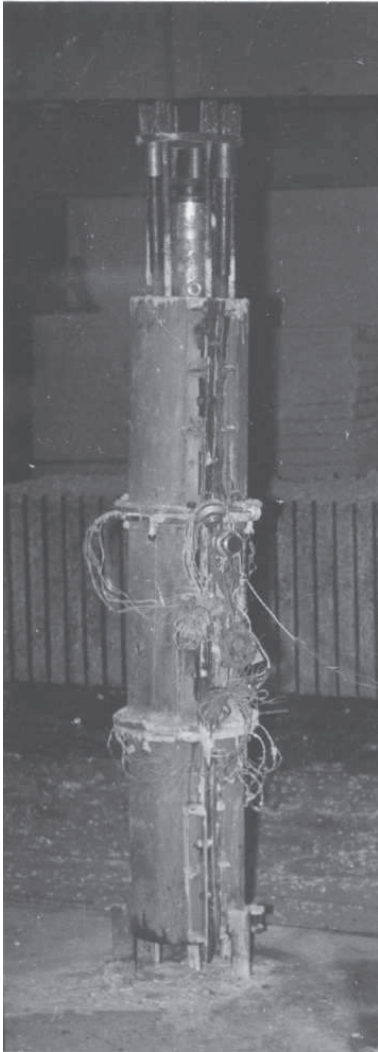
У рівняннях (1) і (2) означений інтеграл характеризує роботу стисненого бетону. У випадку, якщо круглий переріз залізобетонної конструкції не має розтягнутої ділянки, а зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону описується поліномом п'ятого степеня [3] після проведення математичних перетворень, одержано точне вирішення рівнянь (1) та (2) напружено-деформованого стану:

$$\begin{aligned} N = & \pi R^2 \left[ a_1(\varepsilon_1 - \chi R) + a_2 \left( \varepsilon_1^2 - 2\chi \varepsilon_1 R + \frac{5}{4} \chi^2 R^2 \right) + \right. \\ & + a_3 \left( \varepsilon_1^3 - 3\chi \varepsilon_1^2 R + \frac{15}{4} \chi^2 \varepsilon_1 R^2 - \frac{7}{4} \chi^3 R^3 \right) + \\ & + a_4 \left( \varepsilon_1^4 - 4\varepsilon_1^3 R + \frac{15}{2} \chi^2 \varepsilon_1^2 R^2 - 7\chi^3 \varepsilon_1 R^3 + \frac{21}{8} \chi^4 R^4 \right) + \\ & \left. + a_5 \left( \varepsilon_1^5 - 5\chi \varepsilon_1^4 R + \frac{25}{2} \chi^2 \varepsilon_1^3 R^2 - \frac{35}{2} \chi^3 \varepsilon_1^2 R^3 + \frac{105}{8} \chi^4 \varepsilon_1 R^4 - \frac{33}{8} \chi^5 R^5 \right) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ne_0 = & \pi R^3 \left[ a_1 \left( \varepsilon_1 - \frac{5}{4} \chi R \right) + a_2 \left( \chi^2 - \frac{5}{2} \chi \varepsilon_1 R + \frac{7}{4} \chi^2 R^2 \right) + \right. \\ & + a_3 \left( \varepsilon_1^3 - \frac{15}{4} \chi \varepsilon_1^2 R + \frac{21}{4} \chi^2 \varepsilon_1 R^2 - \frac{21}{8} \chi^3 R^3 \right) + \\ & + a_4 \left( \varepsilon_1^4 - 5\chi \varepsilon_1^3 R + \frac{21}{2} \chi^2 \varepsilon_1^2 R^2 - \frac{21}{2} \chi^3 \varepsilon_1 R^3 + \frac{33}{8} \chi^4 R^4 \right) + \\ & \left. + a_5 \left( \varepsilon_1^5 - \frac{25}{4} \chi \varepsilon_1^4 R + \frac{35}{2} \chi^2 \varepsilon_1^3 R^2 - \frac{105}{4} \chi^3 \varepsilon_1^2 R^3 + \frac{165}{8} \chi^4 \varepsilon_1 R^4 - \frac{429}{64} \chi^5 R^5 \right) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} h_{si}. \end{aligned} \quad (4)$$

Значення напружень у сталі  $\sigma_{si}$  можуть визначатися через фіброві деформації

$$\sigma_{si} = \varepsilon_1 - \chi h_{si}, \text{ де } \chi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2R}. \quad (5)$$



**Рисунок 1 – Загальний вигляд колони, зміцненої попереднім обтиском бетону ядра**

Одержані аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану трубобетонних елементів круглого поперечного перерізу в можливому діапазоні зміни властивостей бетону і сталі для будь-якого етапу навантаження конструкції.

Розрахунок несучої здатності нормальних перерізів обтиснених і звичайних конструкцій передбачає знаходження залежності між навантаженням і деформаціями. При цьому максимум на кривій залежності «навантаження–кривина» відповідає величині несучої здатності конструкцій.

При визначенні граничних умов виходять з положення, що міцність перерізу вважається вичерпаною, коли деформації сталі досягають своїх граничних значень, а саме  $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$ .

**Міцність обтисненого бетону матрично-каркасної структури.** На практиці поширені економічно обґрунтовані бетони з контактуючим каркасним розміщенням зерен крупного заповнювача. При цьому більша частина зусилля попереднього обтиснення передається контактно через тонкі плівки розчину від одного зерна заповнювача до іншого.

З огляду на вищезазначене запропоновано методику розрахунку міцності попередньо обтисненого бетону каркасної структури з щільним розміщенням зерен заповнювача. Розрахунковий апарат для практичного використання складено на базі двокомпонентної моделі бетону: цементно-піщаний розчин і крупний міцний заповнювач.

У точках контакту крупного заповнювача на зерно діють зосереджені сили  $N$ , а по поверхні контакту його з цементно-піщаним розчином – розподілене навантаження  $q$ . Дія навантажень на зерно крупного заповнювача враховується як тривимірне.

Беручи до уваги ту обставину, що зерна крупного заповнювача мають різну форму, поверхню і розміри, а їх розміщення в бетоні подібне до того, яке складається в суміші укладеного крупного заповнювача, автор запропонував оцінювати міцність бетону відповідно до величини подрібнюваності суміші крупного заповнювача при стисканні у стандартному циліндрі.

Ураховуючи вищенаведене і виходячи із загальновідомих припущень, одержана формула міцності попередньо обтисненого бетону матрично-каркасної структури

$$f_c = \left( K_n \frac{q}{K_{dp}} + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{bt} \cdot R_{p-nybt} - c\sigma_N \right) \cdot \left( \frac{1}{1 - K_E \cdot n} - K_V r \right), \quad (6)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт пропорційності, який дорівнює 0,2–0,36;

$q$  – стандартне навантаження при визначенні дробильності зерен крупного заповнювача, що дорівнює 11,32 МПа;

$K_{op}$  – коефіцієнт подрібнюваності зерен крупного заповнювача, укладених таким чином, як це зроблено у бетоні; тобто стан може бути насипний, ущільнений вібрацією, динамічним впливом з навантаженням;

$K_1$  – коефіцієнт форми зерен крупного заповнювача, який може набувати значень від 1,27 до 1,55;

$K_2$  – коефіцієнт рельєфу поверхні заповнювача (1,18 – 1,40);

$K_3$  – коефіцієнт мікрорельєфу заповнювача (1 – 1,41).

Для звичайного рядового заповнювача з гранітного щебеню добуток  $K_1 \times K_2 \times K_3$  орієнтовно можна прийняти таким, що дорівнює 2,5.

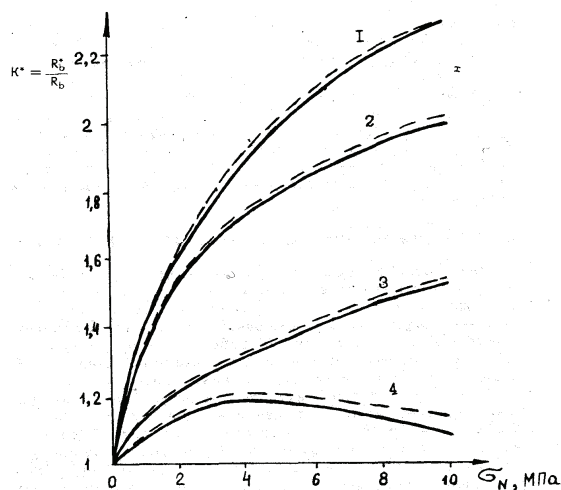
Підвищення міцності звичайного розчину при розтяганні внаслідок обтиснення враховується коефіцієнтом  $K_{bt}$ . Його можна визначити за логарифмічною залежністю

$$K_{bt} = 1 + \alpha_1 \ln 9,8p, \quad (7)$$

де  $\alpha_1 = 0,18$  для традиційного складу бетону.

У формулі (6)  $\sigma_N$  – це напруження попереднього обтиску, що передається на бетонну суміш, а коефіцієнт  $c$  ураховує частку цього напруження, що стискає зерна крупного заповнювача. Для каркасної структури бетону значення коефіцієнта з урахуванням тривалих процесів у бетоні складає величину, близьку до одиниці.

Співвідношення  $r = \frac{V_{p-ny}}{V_b}$  характеризує об'ємну частку розчину в бетоні.



**Рисунок 2 – Залежність величини коефіцієнта підвищення міцності обтисненого бетону від величини і режиму прикладання попереднього навантаження**

----- — експериментальна;  
 ————— — теоретична;

**1 – обтиснення при динамічному впливі і наступному його знятті; 2 – те саме, при збереженні зусилля попереднього обтиснення; 3 – обтиснення без динамічного впливу при наступному його знятті; 4 – те саме, при збереженні зусилля попереднього обтиснення.**

Коефіцієнт ущільнення цементно-піщаного розчину  $K_v$  залежно від величини тиску  $p$  для традиційного бетону визначається за формулою

$$K_v = 1 - 0,027 p^{0,46}, \quad (8)$$

де  $p = 0,279 \sigma_N^{1,11}$ .

Коефіцієнт підвищення модуля початкових деформацій цементно-піщаного розчину  $K_E$  внаслідок обтиснення обчислюється за залежністю

$$K_E = 1 + \alpha_2 \ln 9,8p, \quad (9)$$

де  $\alpha_2 = 0,1$  для прийнятого складу бетону.

Відношення модулів початкових деформацій цементно-піщаного розчину (матриці)  $E_{p-ny}$  і вихідного матеріалу крупного заповнювача  $E_z$  позначено у формулі (6) як  $n$ .

За наведеною формулою (6) можливе також знаходження міцності бетону, в якому зусилля обтиснення  $\sigma_N$  згодом знімається, і надалі воно не довантажує каркас із зерен крупного заповнювача. Для цього значення  $c \cdot \sigma_N$  у формулі слід прирівняти до нуля.

У разі звичайного необтисненого бетону з каркасним розміщенням зерен

крупного заповнювача у формулі (6) значення параметрів  $K_{bt}$ ,  $\sigma_N$ ,  $KE$  та  $K_v$  дорівнюють одиниці.

На рисунку 2 зображено графіки залежності коефіцієнта підвищення міцності бетону

$$K^* = \frac{f_c^*}{f_c} \quad (10)$$

від величини попереднього обтиску і режиму його прикладання. Зіставлення розрахованих залежностей з експериментальними свідчить про їх узгодженість.

Очевидно, що вагому роль у міцності такого бетону відіграють фізико-механічні властивості гірської породи, форма, розміри, шорсткість зерен заповнювача, а також щільність розміщення його у бетоні. За результатами випробувань подрібнюваність крупного заповнювача залежно від його ущільнення змінюється майже вдвічі. Тому досить ефективно застосовувати динамічний вплив при укладанні й обтисненні бетонної суміші.

Стосовно форми зерен крупного заповнювача, слід віддавати перевагу кубоподібній формі щебеню як міцній за подрібнюваністю. Застосування гравію з малошорсткою поверхнею дещо знижує зчеплення його із цементно-піщаним розчином, що негативно впливає на міцність бетону. Крім того, має помітне значення співвідношення модулів деформацій матеріалу крупного заповнювача і розчину. Чим це співвідношення ближче до одиниці, тим рівномірніше розподілення внутрішніх зусиль між складовими бетону й тим вища його міцність у цілому. Останньому, як відомо, сприяє обтиснення цементно-піщаного розчину в бетоні.

Збільшення міцності бетону матрично-каркасної структури за рахунок його обтиснення при динамічному впливі на суміш досягає півтора-два рази при величині тиску до 10 МПа. Міцність бетону, що працює в умовах об'ємного стику сталевую обіймою, може визначатися за відомою формулою

$$f_{b3} = f_c + (k + \Delta k)\sigma_{br}, \quad (11)$$

де  $\sigma_{br}$  – бічний тиск на поверхні контакту сталевій труби з бетоном;

$k$  – коефіцієнт бічного тиску;

$\Delta k$  – поправка, що враховує зміцнення бетону обтиском.

Такий високоміцний бетон може бути ефективно використаний для забезпечення високої несучої здатності трубобетонних елементів з попереднім обтиском.

Висновки:

Запропонована нова технологія поздовжнього обтиску бетонного ядра і зміцнення трубобетонних конструкцій.

Запропоновано залежності для визначення міцності бетонного ядра після обтиску бетонної суміші та твердіння під тиском. Зміцнення бетону зростає до 2,2 разу при прикладанні тривалого тиску 10 МПа.

Установлено, що занадто високий тиск пресування може призводити до дроблення крупного заповнювача і зменшення ефекту зміцнення бетону.

Виведені аналітичні залежності рівнянь напружено-деформованого стану трубобетонної конструкції при малих ексцентриситетах прикладання зовнішнього навантаження. Одержані залежності для оцінювання міцності бетонного ядра перерізу зміцненого поздовжнім обтиском.

#### Література

1. *Бабич Е.М. Предварительно напряженные сваи на основе длительно прессованного бетона / Е. М. Бабич, А. М. Крусь, С. М. Копитман, В. Г. Берегович // Мат-лы XVII респ. конф. УИИВХ. – Ровно. 1969. – С. 186.*

2. Бабич Є. Вплив величини напруги початкового і тривалого пресування на міцність бетону / Є. Бабич, Є. Жук // Будівельні матеріали і конструкції – 1973. – № 1 – С. 36 – 37.
3. Бамбура А.Н. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / А. Н. Бамбура, В. Я. Бачинский, Н. В. Журавлева, И. К. Пешкова – К.: НИИСК, 1987. – 24 с.
4. Матвеев В.Г. Исследование основных физико-механических свойств пресованного бетона / В. Г. Матвеев // Прочность, надежность и долговечность конструкций. Межвуз. сб. – Магнитогорск: МГМИ, 1992. – С. 48–53.
5. Мурашкин Г. В. Особенности изготовления и проектирования конструкций из бетона, твердеющего под давлением. – Куйбышев, 1985. - 258 с. (Рук. деп. во ВНИИИС, № 5880).
6. Саталкин А.В. Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении / А. В. Саталкин, Б. А. Сенченко – М.: Автотрансиздат, 1965. – 210 с.
7. Чеканович М.Г. Напряженно-деформированное состояние железобетонных стоек мостов круглого сечения / М. Г. Чеканович // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: Будівельник, 1992, вип. 50. – С. 112–116.
8. Roy D.M. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques / D. M. Roy, G. R. Gonda, A. Robrowsky // Cement and Concrete Research. 1972. – N. 3. – p. 807–820.
9. Roy D.M. Optimisation of strength in cement pastes / D. M. Roy, G. R. Gonda // The VI International Congress on the Chemistry of cement. Moscow, September. 1974. p. 12.

*М.Г. Чеканович, к.т.н., профессор  
Херсонский государственный аграрный университет*

## **ТРУБОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ, УПРОЧНЕННЫЕ ПРОДОЛЬНОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОБЖАТИЕМ**

*Предложена новая технология изготовления трубобетонных конструкций, которая позволяет упрочнить продольным обжатием бетонное ядро и получить высокопрочные конструкции.*

**Ключевые слова:** *трубобетон, продольное обжатие, бетонная смесь, прочность.*

*M.G. Chekanovych, Ph.D ,professor  
Kherson State Agricultural University*

## **CONCRETE FILLED TUBULAR STRUCTURES STRENGTHENED BY LONGITUDINAL PRECOMPRESSION**

*The article presents a new technology of manufacturing concrete filled tubular structures that makes it possible to strengthen the concrete core by longitudinal compression, and get high-strength structures.*

**Keywords:** *concrete filled tubular structures, longitudinal compression, concrete mix, strength.*

*Надійшла до редакції 30.09.2014*

*© М.Г. Чеканович*