

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Камчатна Світлана Миколаївна

УДК 691.3:699.8(043.3)

ДОВГОЧАСНА ПОВЗУЧИСТЬ ТА БЕТОНИ З НИЗЬКОЮ ДЕФОРМАТИВНІСТЮ

Спеціальність **05.23.05** – будівельні матеріали і вироби

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2005 Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України.

- Науковий керівник:** доктор хімічних наук, професор **Плугін Аркадій Миколайович**, Українська державна академія залізничного транспорту, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд.
- Офіційні опоненти:**
- доктор технічних наук, професор **Чернявський Вячеслав Леонідович**, Харківський державний технічний університет будівництва й архітектури, завідувач кафедри фізико-хімічної механіки і технології будівельних матеріалів і виробів;
 - кандидат технічних наук, доцент **Толмачов Сергій Миколайович**, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів.
- Провідна установа:** Донбаська національна академія будівництва й архітектури, кафедра технології будівельних матеріалів, виробів і автомобільних доріг Міністерства освіти і науки України, м. Макіївка.

Захист відбудеться 29 вересня 2005 року о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Української державної академії залізничного транспорту (61050, м. Харків, майд. Фейербаха, 7).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту.

Автореферат розісланий "26" серпня 2005 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н, доц.

Г.Л.Ватуля

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Експлуатація довгомірних і тонкостінних залізобетонних конструкцій мостів, тунелів, басейнів і інших споруд характеризується їхніми підвищеними деформаціями, які, як показано в роботі, збільшуються зі збільшенням довжини прогонів і габаритів конструкцій. Так, за даними обстеження міжнародною комісією 27 мостів світу, у залізобетонних прогонових спорудах довжиною від 100 до 200 м виявлені за нетривалий термін експлуатації (10-15) років прогини від 20 до 80 см. Динаміка прогинів за ці роки свідчить про те, що вони будуть розвиватися і далі. Зазначені деформації обумовлені повзучістю бетону в стиснутих частинах прогонових споруд, яка була названа нами довгочасною.

Довгочасна повзучість у багатьох конструкціях, що згинаються, і ряді інших приводить до утворення тріщин у розтягнутій зоні, руйнування захисного шару, зменшення терміну їхньої служби.

У зв'язку з викладеним тема дисертаційної роботи, яка присвячена розвитку уявлень про довгочасну повзучість бетону в конструкціях з нього і створенню на цій основі бетону з низькою деформативністю та високою довговічністю, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі “Будівельні матеріали, конструкції і споруди” Української державної академії залізничного транспорту відповідно до планів науково-дослідних робіт, у тому числі держбюджетних (“Розвиток теоретичних основ довговічності штучних споруд на залізничному транспорті”, 1997-1999 рр., №ДР0197U003549, інв. №0200U001741, УДК 624.19/18:625.1), робіт академії, що проводяться в рамках галузевих програм по наукових напрямках Міністерства транспорту та зв'язку України, а також у рамках госпдоговірної тематики кафедри, а також планів роботи V комісії Міжнародної організації співробітництва залізниць (ОСЗ) по темі: “Земляне полотно, штучні споруди, безбаластова колія, ресурсозберігаюча система ведення колійного господарства і технології”.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є розвиток уявлень про довгочасну повзучість бетону в конструкціях з нього і розроблення нових способів визначення складів бетону з низькою деформативністю.

Наукова гіпотеза досліджень полягає в припущенні, що амплітуда і тривалість повзучості бетону у великих конструкціях набагато вище, ніж у стандартних зразках через вплив масштабного фактора, і що забезпечення бетонів з низькою деформативністю можливо за рахунок оптимізації їх структурних характеристик – $(B/L)_{опт}$, коефіцієнтів розсунення зерен щебеню $\alpha_{опт}$, піску $\mu_{опт}$ і введення добавки-суперпластифікатора.

Для досягнення даної мети з урахуванням *наукової гіпотези* в роботі були поставлені такі основні **задачі** наукових досліджень:

- провести аналіз літературних джерел по існуючих теоріях повзучості бетону з оціненням основних факторів, що впливають на його повзучість;
- розвинути уявлення про довгочасну повзучість цементного каменю в бетоні і розробити відповідні фізико-математичні моделі;
- розробити спосіб визначення складу бетону з низькою деформативністю;
- провести фізико-механічні і фізико-хімічні дослідження структури і властивостей, а також реологічних характеристик цементно-водних складів, розчинів і бетонів;
- розробити основи методики прискореного визначення деформацій довгочасної повзучості бетону;
- провести виробничо-експлуатаційні випробування бетону з низькою деформативністю.

Об'єкт досліджень – бетони та конструкції з них.

Предмет досліджень – процеси довгочасної повзучості бетону.

Методи досліджень. У роботі використані стандартні методи дослідження фізико-механічних властивостей цементного каменю і бетону: для визначення фазового складу і структури продуктів гідратації цементу – методи фізико-хімічного аналізу (рентгенографічний РГ, інфрачервоної спектроскопії ІЧС, диференційно-термічного аналізу ДТА і електронномікроскопічний ЕМС із додатковим збільшенням за допомогою сканера і ПЕОМ); для дослідження деформаційних властивостей цементного каменю і бетону – тензорезисторний метод за допомогою автоматичного індикатора деформацій ІДЦ-4; для дослідження деформацій при довгостроковому навантаженні - спеціальні методики й установки, що були розроблені на кафедрі “Будівельні матеріали, конструкції і споруди” УкрДАЗТ.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розвинено уявлення про довгочасну повзучість цементного каменю і бетону, а також про механізми їхнього прояву, що розроблено виходячи з колоїдно-хімічної природи цементного каменю;

- розроблено уточнену реологічну модель цементного каменю, у якій прості реологічні елементи відображають елементи структури цементного каменю - пружно (умовно) подвійні електричні шари ПЕШ, що деформуються, часток і глобул (пружина), макро-, мікро- і гелеві пори, а також процеси фільтрації води по них (поршні з отворами);

- розроблено фізико-математичні моделі повзучості цементного каменю і бетону, у яких кінетика деформацій визначається їхнім коефіцієнтом фільтрації k_f і довжиною шляху фільтрації води (розмірами зразка або конструкції), а гранична величина деформацій ε^{gran} - структурними

характеристиками – водоцементним відношенням V/C і коефіцієнтами розсунення зерен піску μ і щебеню α ;

- отримані розрахункові (по розроблених фізико-математичних моделях) і експериментальні дані, що співпадають, про граничні деформації довгочасної повзучості і безнапірної проникності цементного каменю і бетонів традиційних і оптимальних складів;

- розроблено новий спосіб визначення складу бетону з низькими деформативністю і водопроникністю і методику експериментального визначення оптимальної величини коефіцієнта розсунення зерен піску μ_{opt} ;

- розроблено основи прогнозування довгочасної повзучості бетону в конструкціях.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розроблених уявлень про довгочасну повзучість бетону, а також нового способу визначення складу бетону з низькими деформативністю і водопроникністю, у тому числі: при виготовленні залізобетонних шпал на Київському, Коростенському і Кременчуцькому заводах залізобетонних шпал ЗЗБШ; при посиленні і герметизації залізобетонної ванни басейну “Локомотив” Південної залізниці, що прийшла в аварійний стан; при освоєнні вперше в Україні серійного випуску залізобетонних плит безбаластового мостового полотна БМП на Старокостянтинівському ЗЗБШ.

Особистий внесок здобувача. Усі положення і результати, що виносяться на захист, отримані автором у спільних теоретичних і практичних роботах. У спільних теоретичних роботах автором розроблена теорія деформативності бетону, проведені експериментальні дослідження реологічних властивостей різних складів бетону, розроблена гіпотеза про дифузійний і електрофоретичний механізм швидконатікаючої і звичайної повзучості, виведені рівняння для стадій швидконатікаючої і звичайної повзучості, розроблена і виготовлена установка УВБ для вимірювання деформацій довгочасної повзучості при вигині бетонних зразків-балок, проведені експериментальні дослідження і проведена оброблення результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали і результати наукових досліджень дисертаційної роботи доповідалися на:

1. Нараді експертів V комісії ОСЗ з тематики “Земляне полотно, штучні споруди”. - Україна, Львів, 5-9 жовтня 1998 р.
2. Нараді експертів V комісії ОСЗ з тематики “Земляне полотно, штучні споруди”. - Варна, Болгарія, 28-30 вересня 1999 р.
3. Українському міжгалузевому науково-практичному семінарі “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення”. Наукові праці семінару. – Київ, 22-24 червня 2000 р.
4. Щорічних науково-технічних конференціях кафедр академії і фахівців залізничного транспорту в 1999-2004 рр.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 статей у виданнях, що входять у перелік ВАК, 2 патенти України на винахід, Технічні умови України і “Інструкція з підбору складів важкого бетону, які забезпечують довговічність залізобетонних виробів, конструкцій і споруд на залізничному транспорті”.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, основних висновків, списку літератури з 147 найменувань на 13 сторінках. Містить 180 сторінки основного тексту, 51 рисунок, 3 таблиці, 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, формулюється мета, задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Відображено основні наукові положення і результати досліджень, що виносяться на захист. Приведено інформацію про структуру дисертації, публікації і апробації роботи.

У **першому розділі** виконано критичний аналіз літературних джерел з теми, розглянуті і проаналізовані існуючі гіпотези, уявлення і теорії про природу і механізми тривалої міцності і повзучості бетону, обрані напрямки досліджень, виконано аналіз сучасного стану проблеми повзучості бетону з оціненням основних факторів, що впливають на тривалість повзучості, а також проаналізовані напружено-деформовані стани залізобетонних виробів і конструкцій з урахуванням повзучості бетону.

З теорії залізобетонних конструкцій, що згинаються, відомо, що деформації повзучості значно впливають на напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій. Вони приводять до втрати попереднього напруження в арматурі при обтисненні бетону, до зниження тріщиностійкості конструкцій при випробуваннях на вигин (за рахунок швидконатікаючої повзучості бетону стиснутої зони конструкції), а також при тривалій дії згинаючого навантаження (за рахунок звичайної повзучості бетону).

Тріщиностійкість по утворенню тріщин (нормальних до поздовжньої осі) забезпечується, якщо момент зовнішніх сил M не перевищує момент внутрішніх зусиль у перетині перед утворенням тріщин M_{cr} , тобто

$$M \leq M_{cr}.$$

Момент внутрішніх зусиль визначається рівнянням

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2}bh(h-x) + A_{ft} \left(h - a_{ft} - \frac{x}{2} \right) + \frac{A_f x}{h-x} \times \left(\frac{x}{2} - a_f \right) + \\ & A_{sp} \left(2\alpha + \frac{\sigma_{sp}}{R} \right) \times \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - A'_{sp} \left(\frac{\sigma_{sp}}{R_{bt,ser}} - \frac{2\alpha x}{h-x} \right) \left(\frac{x}{2} - a' \right) \end{aligned} \right], \quad (1)$$

де $R_{bt,ser}$ – напруження в бетоні розтягнутої зони (розтягуюче напруження) перед утворенням тріщини; x – висота стиснутої зони бетону.

У випадку надлишкових деформацій повзучості нейтральна вісь перетину конструкції переміщається, а висота стиснутої зони збільшується, що і приводить до зниження моменту опору тріщиноутворення M_{crc} (рис. 1).

Деформації повзучості бетону проводять також до додаткового вигину залізобетонного елемента, при цьому кривизна осі визначається орієнтовно як тангенс кута нахилу епюри деформацій (рис. 2)



(2)

що наочно показує негативний вплив повзучості бетону на тріщиностійкість залізобетонних конструкцій з нього.

З урахуванням відомого ефекту збільшення короткочасної міцності бетону після його попереднього тривалого обтиснення зроблено висновок, що міцність бетону в стиснутій зоні конструкції, що згинається, (верхня плита або верхній пояс) у процесі тривалої її експлуатації практично не буде змінюватися або буде збільшуватися, а в розтягнутій зоні (низ стінки балки або нижній пояс) - тільки знижуватися, тому що фактор обтиснення і відповідного збільшення міцності бетону в цій зоні відсутній.

Рис. 1. Збільшення висоти стиснутої зони з часом

Рис. 2. До визначення кривизни осі при вигині елемента

Численні дослідження в середині минулого сторіччя дозволили накопичити до 1970-х років значний експериментальний матеріал про повзучість бетонів. Найбільш докладні узагальнення цих даних наведені в роботах Берга О.Я., Бондаренко В.М., Щербакова Є.Н., Писанко Г.Н., Саталкіна А.В., Серьогіна І.Н., Улицького І.І., Вагнера О., Невілля А.М., Лерміта Р., Шейкіна А.Є. із співавт., у роботах ЦНИИС.

Значний внесок у розвиток теорії і уявлень про природу і механізм повзучості бетону зробили вчені: Boltzmann L., Davis R.E. і Davis H.E., Гансен Г., Фрейсине Е.П., Улицький І.І., Цилосані З.Н., Александровський С.В., Барашиков А.Я., Бондаренко В.М., Бовін В.А., Берг О.Я., Голишев А.Б., Ліфшиц Я.Д., Писанко Г.Н., Прокопович І.Е., Гвоздьов А.А., Григорян Г.С., Саталкін А.В., Серьогін І.Н., Ситник В.І. і Іванов Ю.А., Шейкін А.Є., Щербаков Є.Н. Дослідження останніх років зв'язані з іменами Базанта З.П., Вітмана Ф., Гембла Б.Р. із співр., Фельдмана Р.Ф.

Узагальнення дозволяє розділити зазначені уявлення про механізм повзучості бетону на дві групи. В уявленнях першої групи бетон розглядається як суцільне тверде тіло, деформації повзучості якого обумовлені мікроруйнуваннями в ньому, що переходять поступово в порушення цілності, тобто в руйнування. В уявленнях іншої групи бетон розглядається у вигляді колоїдної системи, що містить у цементному камені гель, деформаційні і фільтраційні властивості якого визначають повзучість цементного каменю.

У другому розділі охарактеризовані вихідні матеріали і методи досліджень. У якості вихідних використовувалися стандартні будівельні матеріали: портландцемент ВАТ "Балцем" марки М500 ДСТУ Б В.2.7-46-96; пісок дрібний кварцовий за ДСТУ Б В.2.7-32-95, щебінь гранітний за ДСТУ Б В.2.7-75-98; вода питна водопровідна за ГОСТ 2874-82; добавка-суперпластифікатор типу Дофен, марка Б виробництва фенольного заводу і фірми "Модиф", м. Донецьк.

При випробуванні вихідних матеріалів і виконанні експериментальних досліджень використовувалися стандартні і спеціальні методи вимірів: тензорезисторний - за допомогою автоматичного вимірника деформацій типу АДД-4; реологічний - за допомогою віскозиметра ВЗ-1 (ГОСТ 8420-74); фільтраційний – по безнапірній водопроникності бетону W , см/с.

Для дослідження довгочасної повзучості цементного каменю при стиску і бетону при вигині розроблені і виготовлені спеціальні установки - УРЗ (ричажного типу) і універсальна багатомісна УВБ (на 5 місць), відповідно.

Крім того, у дослідженнях застосовувалися методи фізико-хімічного аналізу: рентгенофазовий РГ - за допомогою дифрактометра ДРОН-3; інфрачервоної спектроскопії ІЧС - за допомогою спектрометра "Термониколет-360"; термічний ДТА - за допомогою дериватографа ім. Курнакова; електронно-мікроскопічний - за допомогою мікроскопа ЭМ-5 методом платиновугільних реплік з додатковим збільшенням електронних фотознімків за допомогою сканера і ПЕОМ.

Третій розділ присвячений розвитку існуючих уявлень про довгочасну повзучість цементного каменю в бетоні.

Відповідно до уявлень А.А.Трапезнікова, якщо тривалість t дії навантаження на тіло значно перевищує час релаксації ($t \gg t_r$), тіло виявляє властивості рідини, якщо $t \ll t_r$ – твердого тіла. Це

правило, а також неврахування масштабного фактора випробовуваних зразків і експлуатованих реальних конструкцій використані нами для пояснення розбіжностей між лабораторними (а значить, нормативними) і реальними (у конструкціях) даними про тривалість протікання явищ повзучості і релаксації.

З урахуванням даних про мікро- і субмікроструктуру цементного каменю, а також будову і властивості ПЕШ часток гелю виконано аналіз реологічних моделей пружно-в'язкого тіла Шведова-Максвелла, еластичного тіла Кельвіна, реологічної моделі бетону Гансена. На основі цього аналізу представлена реологічна модель цементного каменю, у якій прості реологічні елементи відображають елементи структури цементного каменю - подвійні електричні шари ПЕШ часток і глобул гелю, що пружно (умовно) деформуються (пружина), макро-, мікро- і гелеві пори, а також процеси фільтрації води по них (поршень з отворами).

Відповідно до цієї моделі напруження стиску спочатку пружно сприймаються нестисливими частками цементу і кристалогідратів, потім передаються на прошарки між цементними частками, а в них - на нестисливі частки гелю в глобулах, викликаючи пружний стиск (уздовж осі напружень) і розтягання (поперек осі напружень) ПЕШ часток гелю і глобул гелю (пружини). При цьому відбувається видавлювання гелевої води з прошарків між частками гелю в гелеві, а потім і капілярні пори (поршні). Після заповнення водою гелевих і капілярних пор у прошарках і в об'ємі між цементними частками настає режим довгострокового видавлювання води уздовж градієнта напружень по фільтраційному механізму. Зазначена модель використана в якості вихідної для розвитку уявлень про довгочасну повзучість бетону.

У четвертому розділі описані дослідження фазового складу і субмікроструктури продуктів гідратації цементного каменю ($B/C = 0,4$, на 28 добу після пропарювання у стандартному режимі), з якого виготовлялися зразки, що досліджувалися на довгочасну повзучість.

Усі три методи (РГ, ІЧС і ДТА) показали, що в цементному камені серед продуктів гідратації цементу знаходяться кристалогідратні КГ новоутворення - портландит СН, гідромоноссульфоалюмінат кальцію ГМСАК, гексагональний гідроалюмінат кальцію ГТАК або їхні тверді розчини, а також переважно гелеві гідросилікати кальцію ГСК середньої і низької основності.

Дані ЕМС підтвердили наявність цих структурних елементів і дозволили конкретизувати їхні розміри. Зокрема, частки кристалогідратів мають середній розмір $200 \div 600 \text{ nm}$. Гідросилікатний гель складається з негативно заряджених (електроповерхневий потенціал $\psi_0^r = -0,37 \text{ B}$) глобул (середній розмір близько 50 nm) і часток гелю, що їх складають (розмір до 10 nm). Пориста структура гідратних новоутворень представлена порами із середнім радіусом близько 12 nm (мікрокапілярні пори) і радіусом близько $2-5 \text{ nm}$ (гелеві пори).

Отримані дані використані при розробленні фізико-математичних моделей довгочасної повзучості цементного каменю і бетону.

У п'ятому розділі приведено результати експериментальних досліджень і нові уявлення, що впливають з них, про довгострокову повзучість цементного каменю і бетону в конструкціях з нього.

У результаті випробувань зразка 10x10x40 см з цементного каменю (В/Ц=0,4) отримані графіки зміни його деформацій у часі для швидконатікаючої - до 6 хв. (рис. 3, а), звичайної - до 150 діб. (рис. 3, б) і довгочасної - до 900 діб і більш (рис. 4) повзучості. За цими графіками деформація довгочасної повзучості при стиску цементного каменю протікає в чотири стадії

$$\varepsilon = \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} + \varepsilon_{зп} + \varepsilon_{дп}, \quad (3)$$

відповідно, ε_{II} - умовнопружного стиску; ε_{III} - швидконатікаючої повзучості; $\varepsilon_{зп}$ - звичайної повзучості; $\varepsilon_{дп}$ - довгострокової повзучості. У свою чергу на стадії звичайної повзучості виділяється експонентна ділянка нелінійної $\varepsilon_{зп.ЕКСП}$ і лінійної $\varepsilon_{зп.ЛІН}$ повзучості.

Кінетика деформацій на зазначених стадіях довгочасної повзучості представлена відповідними феноменологічними рівняннями.

Рис. 3. Кінетика відносних деформацій швидконатікаючої (а) і звичайної (б) повзучості зразка 10x10x40 см з цементного каменю (В/Ц=0,4)

Рис. 4. Кінетика деформацій довгострокової повзучості зразка 10x10x40 см з цементного каменю (В/Ц=0,4) при напруженні стиску 15,2 МПа

Механізми і кінетика деформацій цементного каменю. Довгострокові деформації цементного каменю визначаються мікро- і субмікроструктурою цементного каменю (розмірами цементних часток, часток і глобул гелю, розмірами і розташуванням відповідних пор), будовою прошарку новоутворень між цементними частками (рис. 5), а також будовою ПЕШ часток гелю й ін.

Рис. 5. Схема прошарку новоутворень з гелю (Г) і кристалогідратів (КГ) між частками цементу (Ц)

У зв'язку з високим ступенем дисперсності гідросилікатного гелю практично уся вода цементного каменю, крім хімічно зв'язаної $V_{хз}$, входить до складу подвійних електричних шарів

(ПЕШ) гелевих часток, утворених шарами потенціалвизначальних іонів з боку часток і протиіонів з боку рідкої фази. У свою чергу шар протиіонів підрозділяється на нерухому і дифузійну частини.

Для гідратованих протиіонів товщину нерухомої частини ПЕШ можна прийняти рівною $\delta_{АДС}^{ВГ} = 0,62 \text{ nm} = 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, що впливає з відомих даних про побудову асоціатів води і відповідає товщині адсорбційного шару молекул води. При стиску цементного каменю дифузійні частини ПЕШ перекриваються (рис. 6).

Рис. 6. Схема граничної деформації подвійних електричних шарів ПЕШ гелевих часток при стиску цементного каменю

Напруження стиску в цементному камені, передане на гель, приводить до зближення часток гелю, перекривання, як відзначалося, їх ПЕШ у прошарках гелевої води, виникнення додаткових відштовхувальних (електростатичної $P_{ЕС}$ і структурної $P_{СТР}$) складових розклинювального тиску, відповідно до теорії ДЛФО і уявлень її структурну складову, що і визначає кінетику деформування цементного каменю на початку навантаження.

Кінетика деформацій на стадіях пружного стиску і швидконатікаючої повзучості і їхній дифузійний механізм. Розглянуті уявлення про електроповерхневі властивості і структуру цементного каменю свідчать про те, що процес його деформування починається зі стиску ПЕШ часток і глобул гелю і дифузійного переміщення протиіонів ПЕШ і гідратованої ними води зі стиснутих ПЕШ часток у гелеві і капілярні пори.

Ґрунтуючись на рівнянні для стаціонарного дифузійного потоку

$$m = -D \frac{dC}{dx} s \tau, \quad (4)$$

і виразі для кількості протиіонів подвійних електричних шарів ПЕШ, що продифундували у напрямку градієнта їхньої концентрації між стиснутими і вихідними нестиснутими подвійними електричними шарами

$$m = \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha^{II} \gamma^r s^r q^r (d^{II})^2}{\left(\frac{1}{\rho^{II}} + \frac{B}{II} \right)}, \quad (5)$$

виведено рівняння для тривалості дифузійного потоку води, що відображає кінетику деформування цементного каменю на стадії пружного стиску і швидконатікаючої повзучості:

$$t_{\text{ПСТ.ШП}} = \frac{\alpha^{\text{Ц}} \gamma^{\text{Г}} s^{\text{Г}} l_{\text{диф}}}{3 \cdot D} \cdot \frac{(d^{\text{Ц}})^2}{\left(\frac{1}{\rho^{\text{Ц}}} + \frac{B}{\text{Ц}}\right)} \cdot \left(\frac{\delta_{\text{Ш.СТ}}^{\text{ВГ}}}{\delta_{\text{Ш.ВИХ}}^{\text{ВГ}} - \delta_{\text{Ш.СТ}}^{\text{ВГ}}}\right) (c) \quad (6)$$

де m – кількість протиіонів, які продифундували, моль; D – коефіцієнт дифузії протиіонів, $\text{см}^2/\text{с}$; $\frac{dC}{dx}$ – градієнт концентрації протиіонів, моль/м; s – площа дифузії, м^2 ; τ – тривалість дифузії, с.

За цим рівнянням тривалість дифузійного переміщення протиіонів ПЕШ залежить від довжини дифузійного шляху $l_{\text{диф}}$, що, у свою чергу, залежить від розмірів пороутворювальних структурних елементів.

Вирази для товщин вихідного $\delta_{\text{Ш.ВИХ}}^{\text{ВГ}}$ і стиснутого $\delta_{\text{Ш.СТ}}^{\text{ВГ}}$ шару води на частках гелю мають вигляд, відповідно:

$$\delta_{\text{Ш.ВИХ}}^{\text{ВГ}} = \frac{\left(\frac{B}{\text{Ц}} - \alpha^{\text{Ц}} 0,227\right)}{\alpha^{\text{Ц}} \gamma^{\text{Г}} s^{\text{Г}}}, \quad \delta_{\text{Ш.СТ}}^{\text{ВГ}} = \frac{q \psi \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2 \cdot \varepsilon_1} + \frac{U_{\text{Г}}^{\text{OH}^-}}{e \psi z^{\text{OH}^-}} + \frac{2U_{\text{Г}}^{\text{Ca}^{2+}}}{e \psi z^{\text{Ca}^{2+}}}\right)}{\text{ПСТР.ВИХ} + \sigma_{\text{СТ}}}, \quad (7)$$

де щільність поверхневого заряду q часток гелю визначається виразом

$$q = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_0^{\text{Г}}}{4 \pi d_1}, \quad (8)$$

у якому $\psi_0^{\text{Г}}$ – електроповерхневий потенціал низькоосновних гідросилікатів кальцію, d_1 – товщина щільної частини їх ПЕШ.

При $\text{В/Ц}=0,4$, ступені гідратації цементу $\alpha^{\text{Ц}}=0,5$, ваговій частці гелю в продуктах гідратації цементу $\gamma^{\text{Г}}=0,65$ і питомій поверхні гелю $s^{\text{Г}} = 2520000 \text{ см}^2/\text{м}$ величина $\delta_{\text{Ш.ВИХ}}^{\text{ВГ}} = 3,5 \text{ нм}$, а $\delta_{\text{Ш.СТ}}^{\text{ВГ}} = 1,91 \text{ нм}$ (при $\sigma_{\text{СТ}}=15,2 \text{ МПа}$).

Розраховані за (6) з обліком цих даних тривалості видавлювання води з ПЕШ між гелевими частками в пори між глобулами, а також у капілярні пори склали 0,9 с і 15 хв, що відповідає експериментальній тривалості стадій пружного стиску і швидконатікаючій повзучості.

Кінетика деформацій на нелінійній ділянці стадії загальної повзучості і їх електрофоретичний механізм. При стиску ПЕШ у прошарках між частками цементу виникає розклинювальний тиск, який дорівнює напруженню від прикладеного навантаження, сумарна сила

в ПЕШ стає рівною нулю, і спочатку процес стискування ПЕШ, що швидко протікає, і самих прошарків загальмовується. У цих умовах установлюється стаціонарний потік води зі стиснутих прошарків між частками цементу в порожнечі між частками. При цьому виникає потенціал течії U між прошарком новоутворень між частками цементу (цементний прошарок) і об'ємом між цементними частками, електричне поле напруженістю $E = U/l_{PP-O}$, а також викликаний потенціалом течії електрофорез глобул і часток гелю. Електрофоретичний потік часток гелю з поверхні глобул в об'єм між ними приводить до руйнування глобул і ущільнення гелю в прошарках між частками цементу. Електрофоретичний потік часток гелю з прошарку - до ущільнення гелю в об'ємі між частками цементу (ущільнення об'ємного гелю) (рис. 7).

Рис. 7. Схема електрофоретичного руйнування глобул гелю в прошарку між цементними частками (а) і переносу часток гелю з прошарку в об'єм між цементними частками (б)

Представлено вирази для тривалості електрофорезу частки $t_{E\Phi}$ і руйнування глобул гелю або ущільнення об'ємного гелю $T_{E\Phi}^{\Gamma, \Gamma_l}$

$$t_{E\Phi} = \frac{l_{E\Phi}}{u_{E\Phi}} = \frac{4\pi\eta l_{E\Phi} l_{PP-O}}{\varepsilon\varepsilon_0 U \zeta}, \quad T_{E\Phi}^{\Gamma, \Gamma_l} = t_{E\Phi}^{\Gamma, \Gamma_l} \cdot N_{E\Phi}^{\Gamma, \Gamma_l}, \quad (9)$$

де $N_{E\Phi}^{\Gamma, \Gamma_l}$ - кількість часток гелю в прошарку між цементними частками або кількість глобул, необхідна для заповнення об'єму між глобулами.

З розрахунку, при тиску $P = 15,2$ МПа (напруження в зразку), потенціал течії, обумовлений

виразом $U = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \zeta P}{4\pi\eta k}$, дорівнює $U = 0,56$ В, $T_{E\Phi}^{\Gamma} \approx 5$ год., а $T_{E\Phi}^{\Gamma_l} \approx 17$ діб. Остання величина відповідає експериментальній тривалості нелінійної частини звичайної повзучості (рис. 3, б).

Кінетика деформації на лінійній ділянці стадії загальної повзучості і на стадії довгочасної повзучості і їхній механізм безнапірної фільтрації. У стиснутих ПЕШ зростає концентрація протионів ПЕШ, що приводить до встановлення градієнта концентрацій ΔC_{CT} протионів між стиснутими (поперек прикладеного навантаження) і нестиснутими (уздовж прикладеного навантаження) прошарками води. При ΔC_{CT} виникає осмотичний тиск води P_{OC} між зазначеними прошарками, що передається на воду в порах і капілярах і приводить до виникнення фільтраційного потоку води від середини зразка до його бічних граней (безнапірна фільтрація води під дією P_{OC}), що визначає лінійний характер кінетики деформацій на зазначених стадіях (рис. 4).

Кількісне оцінення цих деформацій виконане на основі рівнянь безнапірної фільтрації, осмотичного тиску і градієнта концентрації

$$t = \eta \frac{\Delta B_{ВИГ}^{\Gamma} l_{\phi}}{Sk_{\phi} P_{OC}}, P_{OC} = \Delta C_{СТ} RT, \Delta C_{СТ} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_0^{\Gamma}}{4\pi d_1 \delta_{СТ}^{\Psi\Gamma} F} \left(1 - \frac{\delta_{СТ}^{\Psi\Gamma}}{\delta_{ВИХ}^{\Psi\Gamma}} \right). \quad (10)$$

При $\varepsilon = 1$, $\psi_0^{\Gamma} = 0,37 \text{ В}$, $d_1 = 0,252 \text{ нм}$ і $F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ отримані значення $\Delta C_{СТ} = 2,5 \text{ моль/л}$, а $P_{OC} = 0,61 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$.

Виходячи з рівняння стаціонарного осмотичного потоку води в капілярі і виразу, що впливає з нього, для швидкості фільтраційного потоку

$$P_{OC} \cdot S_{ПОП} = \eta \cdot S_{БИЧ} \frac{V}{r}, V_{\phi,БИ} = \frac{P_{OC} \cdot r^2}{2\eta l_{\phi}}, \quad (11)$$

а також визначення коефіцієнта фільтрації як швидкості при одиничному тиску ($1 \text{ кг/см}^2 = 10^5 \text{ Н/м}^2$) і одиничному шляху фільтрації l_{ϕ} (1 м), представлено рівняння для коефіцієнта безнапірної фільтрації цементного каменю

$$k_{БФ} = \frac{10^5 \cdot r^2}{2\eta \cdot 1} = \frac{10^5 \cdot r^2}{2\eta} \left(\frac{\text{М}}{\text{с}} \right). \quad (12)$$

Тривалості стадій звичайної лінійної повзучості (при радіусі капілярів $r = \delta_{ВИХ}^{\Gamma} = 3,5 \text{ нм}$), а також довгострокової повзучості (при радіусі капілярів $r = \delta_{ВИХ}^{\Gamma} = 1,91 \text{ нм}$) представлені рівняннями

$$q = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \psi_0^{\Gamma}}{4 \pi d_1}$$

$$t_{ДП} = \eta \frac{V_{ЦК} \left(\frac{B}{C} - \alpha \cdot 0,227 - \alpha^{\Psi} \gamma^{КГ} \Pi_{ПОР}^{\Gamma} \right) l_{\phi}}{\left(\frac{l}{\rho^{\Psi}} + \frac{B}{C} \right) \rho^{\Gamma} Sk_{\phi} P_{OC}}. \quad (13)$$

Відповідні їм фільтраційні характеристики $k_{БФ,ДП} = 1,225 \cdot 10^{-7} \text{ см/с}$, $t_{ЗП} = 93 \text{ доб}$,
 $k_{БФ,ДП} = 3,65 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{см}}{\text{с}} \right)$, $t_{ДП} = 666 \text{ доб}$.

Граничні відносні деформації стиску цементного каменю. Деформації стиску цементного каменю визначаються рівнянням, що відображає рівність між напруженням в прошарку між

частками гелю від навантаження $\sigma_{НАВ}^{ЧГ}$ і складовими розклинювального тиску в цьому прошарку - електростатичної $P_{ЕС}$ і структурної, у т.ч. вихідної $P_{СТР.ВИХ}$ і після стиску $P_{СТР.СТ}$

$$P_{СТР.ВИХ} + \sigma_{НАВ}^{ЧГ} = P_{ЕС} + P_{СТР.СТ} = \frac{q \left(\frac{\varepsilon\psi}{2} + \frac{U_{\Gamma}^{OH^-}}{ez^{OH^-}} + \frac{2U_{\Gamma}^{Ca^{2+}}}{ez^{Ca^{2+}}} \right)}{\delta_{Ш.СТ}^{ВГ}}, \quad (14)$$

де $U_{\Gamma}^{OH^-}$, $\frac{U_{\Gamma}^{Ca^{2+}}}{e}$ - енергія гідратації потенціалвизначальних іонів OH^- і протиіонів Ca^{2+} подвійних електричних шарів ПЕШ гелевих часток; z^{OH^-} - валентність потенціалвизначальних іонів ($\varepsilon_{Ш.ШП}=1$); e - заряд електронів; γ^{Γ} - вагова частка гелю в продуктах гідратації цементу.

$$\varepsilon_{У.ШП}^{\Gamma P} = \varepsilon_{у} + \Delta\varepsilon_{уу} + \Delta\varepsilon_{ШП}$$

Гранична деформація пружного стиску і швидконатікаючої повзучості цементного каменю.

Виходячи з (14) і рівняння $\Delta\delta_{Ш.СТ}^{ВГ} = \delta_{Ш.ВИХ}^{ВГ} - \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}$, різниця між товщиною шару води у вихідному і стиснутому стані складає:

$$\Delta\delta_{Ш.СТ}^{ВГ} = \frac{\left(\frac{B}{Ц} - \alpha_{Ц} \cdot 0,227 \right)}{\alpha_{Ц} \cdot \gamma^{\Gamma} \cdot s^{\Gamma}} - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \psi^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2\varepsilon_1} + \frac{U_{\Gamma}^{OH^-}}{e\psi z^{OH^-}} + \frac{2U_{\Gamma}^{Ca^{2+}}}{e\psi z^{Ca^{2+}}} \right)}{4\pi d (P_{СТР.ВИХ} + \sigma_{НАВ})}. \quad (15)$$

З урахуванням цієї величини відносна деформація обводненого гелю (за рахунок стиску ПЕШ часток) і гранична відносна деформація цементного каменю представлені рівняннями

$$\varepsilon_{У.ШП}^{OG} = \frac{2\Delta\delta_{Ш.СТ}^{ВГ}}{d^{\Gamma} + 2 \cdot \delta_{Ш.ВИХ}^{ВГ}}, \quad \varepsilon_{У.ШП}^{\Gamma P} = \varepsilon_{У.ШП}^{OG} \cdot \gamma^{\Gamma} \cdot \frac{2 \cdot \delta_{Ш}^{NOB}}{d^{Ц}}, \quad (16)$$

де $\delta_{Ш}^{NOB} = (B/Ц - 0,23) / s^{Ц}$, $2\Delta\delta_{Ш.СТ}^{ВГ}$ - зменшення товщини прошарку води на частках гелю за рахунок стиску ПЕШ під дією стискаючого напруження; d^{Γ} - середній діаметр часток гелю; $\delta_{Ш}^{NOB}$ - товщина шару новоутворень між частками цементу; $d^{Ц}$ - середній діаметр часток найбільш представницької фракції цементу.

Розрахункова величина $U = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta P}{4 \pi \eta k}$ дорівнює експериментальній $\varepsilon_{V,ШП,Е}^{ГР} = 0,0028$.

Гранична деформація на стадії звичайної повзучості. Гранична деформація звичайної повзучості цементного каменю визначається об'ємом гелевих пор

$$V_{ПОР}^Г = \frac{\alpha \alpha^Ц \gamma^Г + \alpha \alpha^Ц \gamma^{КГ} 0,227}{(1 - \Pi_{ПОР}^Г) \rho^Г} \cdot \Pi_{ПОР}^Г \quad (17)$$

Зі зменшенням об'єму води в гелі на величину $V_{ПОР}^Г$ відбувається зменшення товщини шару новоутворень на частках цементу

$$\Delta \delta_{3П}^{ГЛГ} = \frac{\left(\alpha^Ц + \alpha^Ц \left(\frac{B}{C} \right)_{ХЗ} \right) \cdot \Pi_{ПОР}^Г}{\rho^Г (1 - \Pi_{ПОР}^Г) \alpha^Ц s^Г} \quad (18)$$

Відносна деформація прошарку за рахунок руйнування глобул гелю в ньому і зміна відносної деформації цементного каменю на стадії звичайної повзучості (за рахунок часткового руйнування глобул гелю і заповнення частками гелю гелевих пор) визначаються рівняннями

$$\varepsilon_{3П}^{ГЛГ} = \frac{2 \cdot \Delta \delta_{3П}^{ГЛГ}}{d^Г + 2 \cdot \delta_{3П}^{ГЛГ}}, \quad \Delta \varepsilon_{3П}^{ГР} = \varepsilon_{3П}^{ГЛГ} \cdot \gamma^Г \cdot \frac{2 \cdot \delta_{Ш}^{НО}}{d^Ц} \quad (19)$$

Гранична відносна деформація цементного каменю наприкінці стадії звичайної повзучості

$$\varepsilon_{3П}^{ГР} = \varepsilon_{V,ШП}^{ГР} + \Delta \varepsilon_{3П}^{ГР} \quad (20)$$

Гранична деформація на стадії довгочасної повзучості. На стадії довгочасної повзучості виникає зменшення товщини шарів гелевої води в об'ємному гелі, причому до такої ж величини

$\Delta \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}$, як і в прошарках новоутворень, що приводить до зменшення товщини шару новоутворень на цементних частках при закінченні стиску ПЕШ об'ємного гелю

$$\Delta \delta_{Ш.СТ}^{НОВ.ЗАГ} = \frac{\alpha^Ц \cdot \gamma^Г \cdot s^Г \cdot \Delta \delta_{Ш.СТ}^{ВГ}}{3s^Ц} \text{ см} \quad (21)$$

і зміни відносної деформації цементного каменю

$$\Delta \varepsilon_{ДП}^{ЦК} = \frac{2 \cdot \Delta \delta_{Ш.СТ}^{НОВ.ЗАГ}}{d^Ц} - \varepsilon_{V,ШП}^{ЦК.ГР} - \varepsilon_{3П}^{ЦК.ГР} \quad (22)$$

де S^H і s^H - площа поверхні і питома поверхня цементу, см^2 і $\text{см}^2/\text{г}$.

Нарешті, гранична відносна деформація цементного каменю наприкінці стадії довгочасної повзучості визначиться виразом

$$\varepsilon_{ДП}^{ГР} = \varepsilon_{ЗП}^{ГР} + \Delta\varepsilon_{ДП}^{ЦК} \quad (23)$$

Виконані розрахунки (при $V/C = 0,4$ і при $\alpha^H = 0,5$; $\gamma^r = 0,65$ і $s^r = 252 \text{ м}^2/\text{г} = 2520000 \text{ см}^2/\text{г}$; $d^r = 10 \text{ нм}$) дали величини відносних деформацій, дуже близькі до експериментальних, приведених на рис. 3 і 4.

Дослідження впливу довжини шляху фільтрації і V/C на кінетику і граничні відносні деформації повзучості цементного каменю. Експериментальні дослідження підтвердили передбачувану представленими фізико-математичними моделями залежність граничної деформації і її кінетики від довжини шляху фільтрації l_ϕ , від розмірів і форми зразків, від кількості води, що видавлюється, або від V/C , а також взаємозв'язок параметрів деформацій з фільтраційними характеристиками, рис. 8 - 11.

Відповідно до графіка на рис. 8 зменшення l_ϕ у 2,5 рази (2 см проти 5 см) приводить, як очікувалося, до збільшення швидкості деформування на стадії швидконатікаючої повзучості (більш крутий підйом кривої) і приблизно такого ж (у 2,5 рази) скорочення стадії звичайної повзучості (64 доби проти 150 діб).

Зі збільшенням V/C збільшується швидкість зростання і граничні величини відносної деформації пружного стиску, швидконатікаючої і звичайної повзучості, рис. 9 і 10. При $V/C = 0,25$, близькому до $(V/C)_{opt} = 0,23$, цементний камінь має мінімальні деформації пружного стиску (рис. 9) і швидконатікаючої і звичайної повзучості (рис. 10).

За даними рис. 11, кількість води, що поглинається, і такої, що фільтрує через цементний камінь, збільшується зі збільшенням V/C . Звертає на себе увагу, що кінетика зміни безнапірної водопроникності практично збігається з кінетикою деформацій повзучості. Така подібність кривих свідчить про те, що безнапірна водопроникність протікає такими ж стадіями і за такими ж кінетичними закономірностями, що і деформації повзучості.

Рис. 8. Кінетика відносних деформацій зразків-призм $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ і $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ з цементного каменю ($V/C = 0,4$) при напруженні стиску $17,7 \text{ МПа}$

Рис. 9. Зміна відносних деформацій пружного стиску від величини напруги

Рис. 10. Зміна в часі відносної деформації швидконатікаючої повзучості

Рис. 11. Зміна кількості (витрати) води і деформації повзучості (у розподілах шкали) у часі **Граничні деформації довгочасної повзучості бетону**. Показано, що величини тривалості і граничних деформацій довгочасної повзучості бетону залежать від його структурних характеристик – коефіцієнтів розсунення зерен піску μ і щебеню α , за виразами, відповідно

$$\tau^B = \tau^{ЦК} \sqrt[3]{\left(1 - \frac{\mu_{онм}}{\mu}\right) \times \left(1 - \frac{\alpha_{онм}}{\alpha}\right)}, \quad \varepsilon^B = \varepsilon^{ЦК} \sqrt[3]{\left(1 - \frac{\mu_{онм}}{\mu}\right) \times \left(1 - \frac{\alpha_{онм}}{\alpha}\right)}. \quad (24)$$

Крім того, розроблено критерії бетонної суміші, що знижують до мінімуму довгочасну повзучість і безнапірну водопроникність бетону: бетонна суміш повинна бути безусадковою ($OK \rightarrow 0$) при високій її здатності до вібророзтікання BP ; бетонна суміш не повинна містити вільну воду, для чого вона повинна містити добавку-суперпластифікатор в оптимальній кількості; вміст води в бетонній суміші повинен розраховуватися за величиною $(B/C)_{опт} = 0,23$ (для портландцементу) і мінімальним змочуванням піску $W^п_{мін}$ і щебеню $W^щ_{мін}$.

З урахуванням цього розроблено нові способи й оптимальні склади (у тому числі оптимальний вміст добавки-суперпластифікатора ($СП_{опт}$) бетону з низькими деформативністю та водопроникністю.

Деформаційні випробування на вигин і випробування на безнапірну водопроникність бетонних зразків (рис. 12, 13) показали високу ефективність розробленого способу визначення складу і самого складу бетону з низькими деформативністю та водопроникністю.

Рис. 12. Зміна в часі міри повзучості в стиснутій зоні бетонних зразків-балок при вигині і граничній мірі повзучості при стиску традиційного (розрахованого за традиційним способом) бетону

Рис. 13. Залежність безнапірної водопроникності від В/Ц бетону традиційно підібраного складу і бетону оптимального складу з $\mu_{опт}$, $\alpha_{опт}$ і $(B/C)_{опт}$

У шостому розділі представлені результати виробничих випробувань і впроваджень результатів досліджень, що полягають у такому:

- збільшення тріщиностійкості і зниження собівартості залізобетонних шпал для рейкової колії за рахунок упровадження складів з оптимальними коефіцієнтами розсуву піску $\mu_{опт}$ і щебеню $\alpha_{опт}$. Виробнича перевірка ефективності таких складів виконана на Київському і Коростенському, а впровадження - на Кременчуцькому заводах залізобетонних шпал ЗЗБШ. Це дозволило виконати завдання Укрзалізниці по зниженню витрати дефіцитної і дорогої високоміцної дрової арматури класу ВР II без зниження тріщиностійкості шпал;

- використання уявлень про довгочасну повзучість бетону при посиленні і герметизації залізобетонної ванни плавального басейну “Локомотив” Південної залізниці, що втратив несучу

здатність і герметичність через прояв деформацій довгочасної повзучості бетону стін у глибоководній частині ванни басейну;

- використання уявлень про швидконатікаючу повзучість бетону при розробленні нормативної документації: автор дисертації розробила розділ "Порядок контролю" у методиці випробувань плит БМП на тріщиностійкість, а також основні розділи ТУ У 26.6-01116472-088-2003 "Плити залізобетонні безбаластного мостового полотна зі стержневою арматурою без попереднього напруження. Технічні умови". Відповідно до цих ТУ У сертифіковано, а також вперше в Україні освоєно серійний випуск залізобетонних плит БМП на Старокостянтинівському заводі залізобетонних шпал.

ВИСНОВКИ

1. Виходячи з колоїдно-хімічної природи цементного каменю розроблено уявлення про довгочасну повзучість бетону у великогабаритних залізобетонних конструкціях, деформації якої розвиваються протягом декількох десятиліть, і її граничні величини можуть перевищувати нормативні величини для звичайної повзучості.

2. Отримана характерна експериментальна крива довгочасної повзучості зразка-призми 10x10x40 см з цементного каменю з $V/C = 0,4$ тривалістю біля трьох років і зі зміною відносних деформацій у межах 0-0,0075, що розвивається в чотири стадії – умовнопружного стиску, швидконатікаючої, звичайної і довгочасної повзучості.

3. На основі комплексного застосування методів фізико-хімічного аналізу встановлено фазовий склад, мікро- і субмікроструктури цементного каменю випробовуваного зразка, виконано опис і дано фізико-математичні моделі довгочасної повзучості цементного каменю при стиску на основі відомих взаємодій і процесів переносу в дисперсних системах - розклинювального тиску в ПЕШ, дифузії протиіонів ПЕШ, електрофорезу глобул і часток гелю, осмотичного тиску і безнапірної фільтрації води й ін., виконано розрахунки за цими фізико-математичними моделями.

4. Експериментальні дослідження підтвердили коректність фізико-математичних моделей, що установлюють взаємозв'язок кінетики і величин граничних деформацій довгочасної повзучості цементного каменю і бетону з їхніми фільтраційними характеристиками, довжиною шляху фільтрації, обумовленого розмірами конструкції, а також структурними характеристиками V/C , α і μ .

5. Встановлені залежності тріщиностійкості залізобетонних виробів від структурних характеристик бетону – V/C , α і μ , підтверджені виробничими випробуваннями на Київському і Коростенському заводах залізобетонних шпал Укрзалізниці, а кінетичні закономірності і величини граничних деформацій підтверджено експлуатаційними випробуваннями на конструкціях залізобетонної ванни басейну "Локомотив" Південної залізниці.

6. Виконано впровадження результатів досліджень по дисертації, що полягає у використанні при виготовленні і ремонті конструкцій розроблених уявлень про довгочасну повзучість бетону, а також розробленого способу визначення складу бетону з низькою деформативністю та з низькою водопроникністю.

Основні результати дисертації викладено в роботах:

1. Понаднормативна довгочасна повзучість бетону в залізобетонній конструкції місткісної споруди / А.А.Плугін, А.М.Плугін, С.М.Кудренко, Д.А.Плугін // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: Зб.наук. праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2000.- Вип.37.- С.32-44. (Особистий внесок - здобувач особисто розробила теорію деформативності бетону).
2. Сутність граничної деформації повзучості бетону / А.М.Плугін, С.В.Мірошніченко, О.А.Калінін, А.А.Плугін, С.М.Кудренко, В.В.Новіков // Зб. наук. праць.- Харків: ХарДАЗТ, 2000.- Вип. 42.- Ч.1.- С.89-96. (Особистий внесок - здобувач особисто проводила експериментальні дослідження).
3. Развитие теории деформативности бетона на основе преобразованной модели Кельвина / А.Н.Плугин, С.Н.Кудренко, А.А.Плугин, С.В.Мирошніченко, О.А.Калінін // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2000.- Вип.9.- 183-189. (Особистий внесок - здобувач особисто розробила теорію деформативності бетону).
4. Кинетические аспекты количественной теории деформирования бетона / А.Н.Плугин, О.А.Калінін, С.Н.Кудренко, С.В.Мирошніченко, А.А.Плугин // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво (Наукові праці українського міжгалузевого науково-практичного семінару “Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення”, Київ, 22-24 червня 2000 р.). -Київ: УТУ, 2000.-№59. - С.178-182. (Особистий внесок - здобувач особисто розробила теорію деформативності бетону).
5. Исследование деформационных характеристик тонкостенной железобетонной конструкции / А.А.Плугин, А.Н.Плугин, С.Н.Кудренко, Д.А.Плугин, О.А.Калінін // Залізничний транспорт України.- 2001.- №3(24).- С.25-27. (Особистий внесок - здобувач особисто проводила експериментальні дослідження реологічних властивостей різноманітних складів бетону).
6. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Пластичность / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калінін, С.В.Мирошніченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2002. - Вип.17. - С.132-142. (Особистий внесок - здобувач особисто проводила експериментальні дослідження, обробляла результати та виводила основні закономірності).

7. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Жесткость / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2002.- Вип.18.- С.122-129. (Особистий внесок - здобувач особисто проводила експериментальні дослідження, обробляла результати та виводила основні закономірності).
8. Теория удобоукладываемости бетонных смесей. Уплотняемость / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, Д.А.Плугин, С.Н.Кудренко // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2002. - Вип.19. - С.233-238. (Особистий внесок - здобувач особисто проводила експериментальні дослідження, обробляла результати та виводила основні закономірності).
9. Физико-математические модели долговременной ползучести и безнапорной водопроницаемости цементного камня и бетона / А.Н.Плугин, А.А.Плугин, О.А.Калинин, С.В.Мирошниченко, С.Н.Кудренко, А.В.Никитинский, В.А.Лютый // Зб.наук.праць Луганського нац. аграрного ун-ту. Серія "Технічні науки". - Луганськ: ЛНАУ, 2004.- №40(52).- С.145-154. (Особистий внесок - здобувач особисто розробила гіпотези про дифузійний та електрофоретичний механізми швидконатікаючої повзучості бетону, вивела рівняння для стадій швидконатікаючої та звичайної повзучості).
10. Кудренко С.М. Експериментальні дослідження довгострокової повзучості бетону при вигині зразка-балки // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: Зб.наук. праць.- Харків: УкрДАЗТ, 2004.- Вип.63. - С.129-134. (Особистий внесок - здобувач особисто провела експериментальні дослідження та обробила отримані результати).
11. Інструкція з підбору складів важкого бетону, які забезпечують довговічність залізобетонних виробів, конструкцій і споруд на залізничному транспорті /А.М.Плугін, О.А.Калінін, А.А.Плугін, С.В.Мірошніченко, Арт.М.Плугін, Д.В. Шумик, Д.А.Плугін, С.М.Кудренко. – Харків: ХарДАЗТ, 2001.- 39 с. (Особистий внесок - здобувач особисто провела експериментальні дослідження та обробила отримані результати).
12. Плити залізобетонні безбаластного мостового полотна зі стержневою арматурою без попереднього напруження: Технічні умови ТУ У 26.6-01116472-088-2003: Плугін А.М., Мірошніченко С.В., Калінін О.А., Плугін А.А., Кудренко С.М., Плугін Д.А., Лютый В.А., Никитинський А.В.: Узгоджено управл.колійн.госп. Укрзалізниці 20.04.2003 р.: Термін дії встановлений з 19.05.2005 до 19.05.2008 р. /Міністерство транспорту України. – Харків, 2003. (Особистий внесок - здобувач особисто розробила розділ "Порядок контролю" у методиці випробувань плит БМП на тріщиностійкість, а також основні розділи).

13. Деклараційний патент 71122А Спосіб визначення складу важкого бетону з мінеральним наповнювачем / Плугін А.М., Калінін О.А., Мірошніченко С.В., Плугін А.А., Плугін Арт.М., Кудренко С.М., Лютий В.А., Никитинський А.В., Підтеліжнікова І.В., - № С04В28/12; Заявл. 21.08.2003 р., Опубл. 15.11.2004 р. Бюл. № 11 (Особистий внесок - здобувач особисто провела експериментальні дослідження та обробила отримані результати).
14. Деклараційний патент 62613А Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону / Плугін А.М., Калінін О.А., Мірошніченко С.В., Плугін А.А., Кудренко С.М., Лютий В.А., Никитинський А.В., Підтеліжнікова І.В., Линник Г.О., Костюк М.Д., Яковлев В.О. - № С04В28/12; Заявл. 15.04.2003, Опубл. 15.12.2003 р. Бюл. № 12 (Особистий внесок - здобувач особисто провів експериментальні дослідження та обробив отримані результати).

АНОТАЦІЯ

Камчатна С.М. Довгочасна повзучість та бетони з низькою деформативністю. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали і вироби. – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2005.

Дисертація присвячена дослідженню і розвитку теоретичних уявлень про довгочасну повзучість цементного каменю і бетону і створенню бетону з низькими деформативністю, водопроникністю і високою довговічністю.

Дано опис і кількісний взаємозв'язок деформацій повзучості з втратами попереднього напруження у арматурі при обтисненні бетону, з пониженням тріщиностійкості і додатковим вигином залізобетонних конструкцій при випробуваннях на вигин та тривалій дії навантажень, що згинають.

Дана уточнена реологічна модель цементного каменю, у якій прості реологічні елементи зображують елементи структури цементного каменю, а також процеси фільтрації води по них.

Отримано характерну експериментальну криву довгочасного (біля трьох років) деформування зразка-призми з цементного каменю, на підставі якої встановлені 4 стадії розвитку довгочасної повзучості бетону – умовнопружно-го стискування, швидконатікаючої, звичайної та довгочасної повзучості.

Представлені фізико-математичні моделі кінетики і граничних деформацій довгочасної повзучості цементного каменю при стисненні на кожній вказаній стадії, виконані відповідні розрахунки по вказаних моделях.

Експериментальні дослідження підтвердили коректність фізико-математичних моделей, що встановлюють взаємозв'язок кінетики і величин граничних деформацій довгочасної повзучості цементного каменю і бетону з їхніми фільтраційними характеристиками, розмірами конструкції та зразків, а також структурними характеристиками - B/C , α і μ .

Розроблено новий спосіб розрахунку складу бетону з низькою деформативністю та з низькою водопроникністю.

Результати досліджень підтверджені виробничими та експлуатаційними випробуваннями і впроваджені.

Ключові слова: довгочасна повзучість, бетон, тріщиностійкість, довговічність, низька деформативність, реологія.

АННОТАЦИЯ

Камчатная С.Н. Долговременная ползучесть и бетоны с низкой деформативностью. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2005.

Диссертация посвящена исследованию и развитию теоретических представлений о долговременной ползучести цементного камня и бетона и созданию бетона с низкими деформативностью, водопроницаемостью и высокой долговечностью.

Дано описание и количественная взаимосвязь деформаций ползучести с потерями предварительного напряжения в арматуре при обжатии бетона, с понижением трещиностойкости и дополнительным изгибом железобетонных конструкций при испытаниях на изгиб и длительном действии изгибающей нагрузки. Получена экспериментальная кривая долговременного деформирования цементного камня, установлены четыре стадии его долговременной ползучести.

На основе физико-химического анализа и электронно-микроскопических исследований представлены уточненная реологическая и коллоидно-химическая модели цементного камня, даны схемы и описан механизм деформирования при сжатии в результате диффузии, электрофореза, осмоса и безнапорной фильтрации противоионов ДЭС, воды и частиц геля в прослойках и объеме цементного камня, выполнены соответствующие расчеты по указанным моделям.

Экспериментальные исследования подтвердили корректность физико-математических моделей, устанавливающих взаимосвязь кинетики и предельных деформаций долговременной ползучести цементного камня и бетона с их фильтрационными, геометрическими и структурными характеристиками. Разработан новый способ расчета состава с низкими деформативностью и водопроницаемостью бетона.

Результаты исследований подтверждены производственными и эксплуатационными испытаниями и внедрены: при изготовлении железобетонных шпал на Киевском, Коростеньском и Кременчугском заводах железобетонных шпал ЗЖБШ Укрзализниці; при усилении и герметизации железобетонной ванны бассейна „Локомотив” Южной железной дороги, пришедшей в аварийное состояние; при освоении серийного выпуска железобетонных плит безбалластного мостового полотна БМП на Староконстантиновском ЗЖБШ, при разработке нормативной документации.

Ключевые слова: долговременная ползучесть, бетон, трещиностойкость, долговечность, низкая деформативность, реология.

ABSTRACT

Kamchatnaya S.N. Long-term creep and low-deformed concrete. – Manuscript.

The dissertation on reception of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.23.05 – building materials and products. – Ukrainian state academy of a railway transport, Kharkov, 2005.

The dissertation is devoted to research and development of theoretical representations about long-term creep of a cement stone and concrete and to creation low-deformed with low water penetration and high durability of concrete.

The description and quantitative interrelation of deformations of creep with losses of a preliminary stress in armature is given at squeezing concrete, with downturn crack-resisting and an additional bend of reinforced-concrete constructions at tests for a bend and long action of bending loading. The experimental curve of long-term deformation of a cement stone is received, 4 stages of its long-term creep are established. Are submitted specified rheological and colloidal-chemical models of a cement stone, the mechanism of deformation, physical and mathematical models of kinetics and limiting deformations of long-term creep of a cement stone is described at compression, corresponding calculations on the specified models are executed.

Experimental researches have confirmed a correctness of the physical and mathematical models establishing interrelation of kinetics and limiting deformations of long-term creep of a cement stone and concrete with their filtrational, geometrical and structural characterizations. Is developed new method of calculation of consist of low-deformed with low water penetration of concrete.

Results of researches are confirmed with industrial and operational tests and introduced.

Key words: long-term creep, concrete, crack-resisting, durability, crack-resisting, rheological.

Підписано до друку 26.08.2005 р.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Офс. друк. Обл.-вид. арк.. 0,9

Замовлення № 701/05. Тираж 100 прим.

Видавництво ХНАДУ, 61200, м. Харків-МСП, вул. Петровського, 25

*Свідоцтво державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення
України про внесення суб'єктів видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і
розповсюджувачів видавничої продукції,
серія ДК № 897 від 17.04.2002 р.*