

УДК 666.971

ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ БЕТОНІВ

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

CRACK RESISTANCE OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Позняк О. Р., Солодкий С. Й., Кіракевич І. І. (Національний університет „Львівська політехніка”, м. Львів)

Позняк О. Г., Солодкий С. И., Киракевич И. И. (Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов)

Pozniak O. R., Solodkyi S. Y., Kirakevych I. I. (National University "Lviv Polytechnic", Lviv)

В роботі проведено дослідження силових та енергетичних показників тріщиностійкості самоущільнювальних бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем за методами і критеріями механіки руйнування.

В работе проведено исследование силовых и энергетических показателей трещиностойкости самоуплотняющихся бетонов на основе суперпластифицированных цементующих систем по методам и критериям механики разрушения.

In this paper the fracture toughness characteristics of Self-compacting concretes (SCC) based on superplasticized cementitious systems with using methods of mechanics are shown.

Ключові слова:

Самоущільнювальний бетон, суперпластифікована цементуюча система, методи та критерії механіки руйнування, силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості.

Самоуплотняющийся бетон, суперпластифицированная цементующая система, методы и критерии механики разрушения, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости.

Self-compacting concretes (SCC), superplasticized cementitious systems, methods of mechanics, fracture toughness characteristics.

Постановка проблеми. Широкого впровадження в сучасному інноваційному будівництві набув самоущільнювальний бетон (Self-

compacting concrete – SCC) на основі суперпластифікованих цементуючих систем [2]. Особливістю цього матеріалу нового покоління є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації при самочинному виділенні повітря, в т.ч. і в густоармованих конструкціях, що передбачає максимальне уникнення трудомістких та енергозатратних операцій його вкладання та ущільнення [3]. Для ефективного використання цементуючих систем у бетонах та конструкціях різного функціонального призначення на їх основі необхідно дослідити властивості, що забезпечують їх довговічність і тріщиностійкість [7, 8]. Для визначення максимальної несучої здатності конструкції з системою фактичних тріщин використовують методи та критерії механіки руйнування, в основу яких покладені критичні значення параметрів напружено-деформованого стану в перерізах контруктивних елементів – в'язкість руйнування та енергія руйнування [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із накопиченням експериментальних даних необхідно здійснити перехід від міцнісної до кінетичної концепції руйнування, а відтак – і нової методики розрахунку самоущільнювальних бетонів, в основу якої покладені інваріантні константи бетону – в'язкість руйнування та енергія руйнування [6]. Критерій надійності і довговічності бетону визначається здатністю елементів структури перерозподіляти та гасити локальні напруження в нестійких тріщинах в період раннього тверднення та експлуатації при знакоперемінних навантаженнях. Тому, закономірно, що в технології бетону і механізмі керування його структуроутворенням з'явився новий напрямок, заснований на гальмуванні процесів руйнування. Існує прямиий зв'язок між специфікою структури бетону і механізмом його руйнування [9]. Багаторазові спільні дії води і від'ємних температур послаблюють і руйнують структуру бетону. Міцність його знижується настільки, що під дією навантаження в ньому з'являються незворотні деформації. Крім того, під впливом змінного у часі навантаження відбувається мікрODEFORMУВАННЯ матеріалу. Деякі порушення суцільності структури відіграють суттєву роль при наявності великої кількості мікроруйнувань, які зливаються і утворюють суцільну зону відриву. Зародки тріщин спочатку виникають в межах контактних зон цементного каменю і заповнювача. З подальшим навантаженням ці зародки концентруються у вигляді „ланцюжків розпушування” і поступово об'єднуються в суцільні макротріщини [3, 5].

Міцність цементобетону на стиск визначається міцністю зчеплення між складовими мезоструктури бетону і внутрішнім тертям, а міцність на розтяг – переважно міцністю зчеплення між складовими мезоструктури бетону. Тому поява мікротріщин в структурі цементобетону внаслідок деструкції або стискання свідчить про зменшення міцності зчеплення. Забезпечення ущільнення структури бетону досягається різними фізичними та технологічними прийомами. Перспективними в технології бетону є

використання суперпластифікованих цементуючих систем, що представляють в'язучу композицію „портландцемент – активні мінеральні добавки – мікронаповнювачі – суперпластифікатори – прискорювачі тверднення” та впливають на тужавіння і рухливість бетонної суміші, швидкість наростання міцності, тепловиділення, усадку, корозійну стійкість і морозостійкість бетону тощо [2].

Однією з найважливіших задач, що виникає при обстеженні та проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій, пов'язана з врахуванням впливу тріщин на роботу конструкції. При цьому найчастіше необхідно визначити розміри прогнозованих тріщин або оцінити несучу здатність конструкції, що має тріщину. Наявність тріщин (силових і технологічних) обумовлюється як природою формування структури бетону, так і роботою композиційного матеріалу під дією навантаження. Для визначення максимальної несучої здатності конструкції з системою фактичних тріщин використовують методи та критерії механіки руйнування. При розгляді бетону як конструкційного матеріалу в рамках понять механіки твердого деформованого тіла і механіки руйнування в якості нових характеристик його тріщиностійкості використовують критичні значення параметрів напружено-деформованого стану в перерізах конструктивних елементів, що визначаються за результатами випробувань контрольних зразків[4].

Основним критерієм при підборі складу бетону сьогодні є міцність. Вважається, що правильно підібраний склад бетону за міцністю при дотриманні системи певних обмежень за витратою цементу, води, об'ємного вмісту піску і щебеню забезпечує нормативний термін безвідмовної експлуатації конструкції. Проте у межах одного класу міцності на стиск бетони характеризуються різною тріщиностійкістю, що обумовлює широкий діапазон значень силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості [5].

Метою роботи є визначення силових та енергетичних показників тріщиностійкості самоущільнювальних бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем за методами і критеріями механіки руйнування.

Результати експериментальних досліджень. Врахування енергетичної „зарядженості” повністю рівноважної діаграми деформування (ПРДД) бетону при згині з наперед створеною тріщиною нормального відриву дає можливість запроєктувати бетонні елементи з перетинами, які відповідають умовам роботи конкретної конструкції, що дозволяє контролювати процес деформування дослідного елемента на всіх стадіях його роботи і отримати повну діаграму поведінки бетону, включаючи низхідну вітку [4, 5]. Характеристики тріщиностійкості бетонів визначали при рівноважних механічних випробуваннях за схемою триточкового згину із записом повної діаграми навантаження-прогин ($F-V$) з метою отримання силових та

енергетичних характеристик тріщиностійкості бетону згідно ДСТУ Б В.2.7-227:2009 [1].

Для приготування самоущільнювальних бетонів при проведенні експериментальних досліджень використовували суперпластифіковані цементуючі системи на основі портландцементу ПЦ І-500-Н ПАТ “Івано-Франківськцемент”, золи-винесення Бурштинської ТЕС (ЗВ), вапнякового мікронаповнювача (ВБ), комплексної мінеральної добавки на основі метаксаоліну (МК), суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (ПК) та прискорювачів тверднення (роданіду та тіосульфату натрію – ТРН). Як дрібні заповнювачі до бетону використовували суміш кварцових пісків Ясинецького ($M_k=1,32$) та Жовківського родовищ Львівської області ($M_k=2,77$), в якості крупного заповнювача – гранітний щебінь фракції 5-20 мм.

Дослідження характеристик тріщиностійкості бетонів (Ц:П:Щ=1:1,52:2,04, Ц=480 кг/м³) здійснювали через 360 діб нормального тверднення. Результати досліджень характеристик міцності та деформативності самоущільнювальних бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем наведено в табл. 1-3, а ПРДД – на рис. 1. Загальний вигляд діаграм деформування бетону на основі ПЦ І-500 свідчить, що перелом діаграми відбувається при значно нижчих значеннях критичного навантаження порівняно з бетонами на основі цементуючих систем (рис. 1). Граничні деформації, за яких відбувається дефрагментація зразків не перевищують $470 \cdot 10^{-6}$ м, що у 1,1-1,4 рази менше ніж для бетонів на основі цементуючих систем. Очевидно, що з мірою наповнення цементуючої матриці дрібним наповнювачем посилюється тенденція зростання ролі адгезійних сил, а роль когезійних сил у цементуючій системі в процесах деформування і руйнування матеріалу зменшується.

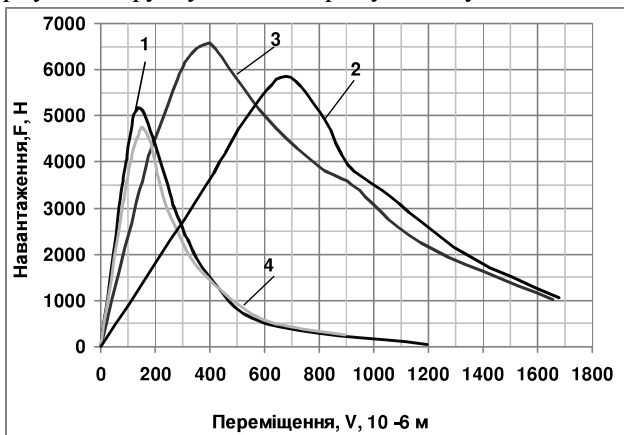


Рис. 1. Повністю рівноважна діаграма деформування самоущільнювальних бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем з добавками: 1 – МК; 2 – МК + ЗВ; 3 – МК + ВБ; 4 – ПЦ І-500

Використання суперпластифікованих цементуючих систем забезпечує зростання міцності в 1,6-2,1 рази порівняно зі складом бетону на основі ПЦ І-500 без добавок, а модуль пружності при згині має близькі значення з перевагою для бетонів з використанням добавки метакаоліну (МК) та вапнякового борошна (ВБ) (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонів

Склад	Добавка	Міцність на стиск, МПа, R_b	Міцність на розтяг при згині, МПа, R_{tb}	Модуль пружності при згині $E_{tb} \cdot 10^{-3}$, МПа
1	МК	67,9	4,99	13,73
2	МК + ЗВ	82,7	5,68	19,08
3	МК + ВБ	88,2	8,00	24,20
4	ПЦ І-500	42,3	6,38	19,34

Аналіз докритичної стадії деформування виявляє беззаперечну перевагу бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем. Так, значення частки енерговитрат на пружне деформування (W_e) для бетонів без мінеральних добавок становить $28,94 \cdot 10^2$ Н·м, а для бетонів на основі цементуючих систем з добавкою метакаоліну та поєднання добавки МК з вапняком – відповідно $30,16 \cdot 10^2$ та $93,24 \cdot 10^2$ Н·м. Значно перевищує ці показники частка енерговитрат на пружне деформування (W_e) у складі бетону на основі суперпластифікованих цементуючих систем із використанням золи-винесення ($W_e \cdot 10^{-2} = 188,56$ Н·м). Так, значення загальних енерговитрат на докритичне деформування (W_i) бетонів на основі суперпластифікованих цементуючих систем перевищує показник для базового складу в 4,4-5,6 раз (табл. 2). Частка енерговитрат на пружне деформування (W_e) у складі енерговитрат на докритичне деформування (W_i) для бетонів на основі ПЦ І-500 становить 78%, а для бетонів на основі цементуючих систем з добавкою метакаоліну та золою-винесення (ЗВ) – $W_e/W_i = 90\%$, що дає підстави стверджувати про те, що до моменту початку руху магістральної тріщини матриця переважно працює в зоні пружних деформацій.

Витрати енергії на стадії мікротріщиноутворення та формування кінцевої зони магістральної тріщини (W_m) для бетонів на основі ПЦ І-500 та з використанням цементуючих систем із добавкою метакаоліну приблизно рівні. В той же час, при використанні добавки МК в комплексі із золою-винесення або вапняковим борошном значення W_m зростає в 2,5 і 8,8 раз відповідно порівняно з бетоном на основі ПЦ І-500. Це свідчить про те, що бетони на основі розроблених цементуючих систем найкраще опираються дисипативним процесам розвитку тріщин й злиття мікротріщин. За показниками енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини, $W_L \cdot 10^{-2}$, використання цементуючих систем перевищує аналогічні показники для ПЦ І-500 в 2,7-3,9 рази. Величина

повних пружних енерговитрат на статичне деформування до поділу зразка на частини (W_{ce}) для досліджуваних бетонів вирівнюється у всіх складах ($28,19-33,48 \cdot 10^2$ Н·м), однак різко зростає для бетону з використанням добавки МК та вапнякового борошна ($85,48 \cdot 10^2$ Н·м), що обумовлює його перевагу за силовим критерієм – в'язкістю руйнування.

Таблиця 2

Силові характеристики тріщиностійкості бетонів

Склад	$W_m \cdot 10^{-2},$ Н·м	$N_e \cdot 10^{-2},$ Н·м	$W_f \cdot 10^{-2},$ Н·м	$W_L \cdot 10^{-2},$ Н·м	$W_{ur} \cdot 10^{-2},$ Н·м	$W_{ce} \cdot 10^{-2},$ Н·м
1	7,14	30,16	37,30	272,99	14,94	33,48
2	19,30	188,57	207,87	295,94	93,39	28,19
3	69,01	93,24	162,25	402,07	46,18	85,48
4	7,83	28,94	36,77	101,73	14,22	33,00

Відмінності у значеннях статичного джей-інтеграла (J_i), що характеризує роботу пластичної деформації та руйнування, а також поле напружень і деформації поблизу вершини магистральної тріщини перед початком її руху для досліджуваних бетонів на основі ПЦ І-500 та з добавкою метакаоліну не перевищують 1,5-2,0% (табл. 3). Разом з тим, значення J_i при поєднанні добавки МК із золюю-винесення або вапняковим борошном перевищують значення джей-інтеграла бетону на основі ПЦ І-500 в 4,4-5,7 раз. Питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування (G_F) для бетонів на основі ПЦ І-500 становлять $217,78$ Дж/м², а при використанні суперпластифікованих цементуючих систем цей показник є більшим у 2,3-3,8 рази. В'язкість руйнування в докритичній стадії (K_i) та на стадії поширення тріщин (K_c) є найвищою (1,32 та $0,96$ МПа·м^{1/2} відповідно) для бетонів з добавкою МК та вапняковим мікронаповнювачем. Це свідчить про те, що за наявності макротріщини бетони з високою міцністю працюють краще. Значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (K_c) для даного складу бетону на 22% перевищує відповідний показник для бетонів на основі ПЦ І-500.

Таблиця 3

Енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів

Склад	$G_i,$ Дж/м ²	$G_F,$ Дж/м ²	$G_{CE},$ Дж/м ²	$J_i,$ Дж/м ²	$K_i,$ МПа·м ^{1/2}	$K_c,$ МПа·м ^{1/2}
1	62,17	505,26	55,80	37,27	0,87	0,82
2	346,45	807,51	46,99	190,81	0,93	0,34
3	270,40	825,51	142,47	193,45	1,32	0,96
4	61,28	217,78	55,00	37,58	0,82	0,79

Отже, використання суперпластифікованих цементуючих систем забезпечує покращення властивостей бетонів на стадії утворення і розповсюдження магистральної тріщини за рахунок позитивної ролі контактних зон цементуючої матриці та дрібного заповнювача. При деформуванні і руйнуванні матеріалів на різних цементуючих системах

виявлено закономірність: застосування портландцементу ПЦ І-500 та цементуючих систем на його основі з додавкою метакаоліну зумовлює крихкий характер руйнування; використання цементуючих систем з поєднанням добавки МК з золою-винесення або вапняком сприяє найбільшому розвитку в'язкопластичних деформацій і повноті діаграми деформування в закритичній стадії.

Висновки. Прогрес у використанні досягнень бетонознавства на сучасному етапі значним чином пов'язують з розвитком уявлень у галузі механіки руйнування бетону. Особливої актуальності це завдання набуває при впровадженні бетонів на основі цементуючих систем з мінеральними та комплексними хімічними добавками. Повністю рівноважна діаграма деформування (ПРДД) бетону при згині з наперед створеною магістральною тріщиною є носієм вичерпної інформації про тріщиностійкість і дає змогу за енергетичним критерієм оцінити опір руйнуванню бетонного елемента та запроектувати ефективні перетини, які відповідають умовам роботи конкретної конструкції, а використання силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості дозволяє проаналізувати роботу матеріалу в докритичній та закритичній стадії. Застосування суперпластифікованих цементуючих систем в складі самоущільнювальних бетонів забезпечує такий склад гідратних новоутворень і характер мікропористості, які щонайкраще гальмують процес утворення нових поверхонь і сповільнюють розвиток магістральної тріщини.

1. ДСТУ Б В.2.7-227:2009. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні.
2. Саницький М.А. Особливошвидкотверднучі композиції для високофункціональних бетонів / М.А. Саницький, У.Д. Марущак, І.І. Кіракевич, Т.А. Мазурак // Вісник НУЛП „Теорія і практика будівництва”.—Львів, 2013— № 755.—С. 385-390.
3. Позняк О.Р. Сучасні високофункціональні бетони / О.Р. Позняк, М.А. Саницький // Будівельні матеріали та виробы, 2009. — № 3 (48). — С. 7-8.
4. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения. — Минск: „Тыздєнь”, 1999. — 265 с.
5. Солодкий С.Й. Трещиностійкість бетонів на модифікованих цементах: Монографія. — Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2008. — 144 с.
6. Солодкий С.Й., Стащук М.Г. Застосування повністю рівноважної діаграми деформування для оцінки опору руйнування бетонів // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. — Львів: Каменяр, 2007. — Вип. 7. — С. 334-342.
7. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC//New Technologies and Materials in Civil Engineering, Milan, 2003.—P.
8. Szwabowski J. Technologia betonu samozageszczalnego / J. Szwabowski, J Golaszewski. Krakov: Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2010. — 160 p.
9. Solodkyy S.Y., Rusyn R.M., Gayvanovich R.V. The fracture toughness characteristics of concretes on base of the modified composite Portland cements // Proceedings of the 16 IBAUSIL, 20-23 September 2006, Bundesrepublik. — Weimar. — P.1127-1134.