

ЗАСТОСУВАННЯ РІВНЯННЯ ВАЛЕНТИ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ПОКАЗНИКІВ ВОДОНЕПРОНИКНОСТІ БЕТОНУ

Терещенко Т.А.

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»

Вступ

Довговічність залізобетонних конструкцій залежить від здатності бетону протистояти переміщенню агресивних середовищ:

- при виникненні градієнту тиску (характеризується проникністю бетонів);
- при виникненні градієнту концентрацій (характеризується дифузійними властивостями бетонів);
- під дією капілярних сил (характеризується сорбційними властивостями бетонів).

Основним носієм агресивних компонентів є вода; проникність бетону водою є найбільш важливою серед зазначених характеристик. Прямі методи визначення водонепроникності бетонів класифікуються за характером фільтрації води як

- методи випробувань за умов сталого руху води;
- методи випробувань за умов несталого руху води.

Сталий (або ламінарний) рух води у бетоні характеризується відсутністю явищ дифузії, сорбції, капілярних сил, сил тертя, а також хімічної взаємодії води з бетоном. Обов'язковою умовою його розвитку є повне насичення бетону водою, коли подальше насичення не здатне змінювати характер взаємодії води з бетоном. Метою випробувань за умов сталого руху є визначення коефіцієнту фільтрації води в бетоні [1, 2].

Серед методів випробувань за умов несталого руху слід виділити метод з визначенням глибини проникнення води [3-5]. Результати випробувань за даним методом дозволяють також обчислювати коефіцієнт фільтрації, близький до цього показника для умов сталого руху води, з застосуванням рівняння Валенти (Valenta) [6-8].

Положення основних методів визначення водонепроникності бетону за умов сталого і несталого руху води

Теоретичні положення

Сталий рух води в бетоні відбувається згідно з законом Дарсі, який описує переміщення рідин та газів у пористому середовищі і встановлює залежність швидкості фільтрації рідини або газу від градієнту напору. Для процесу фільтрації в'язкої рідини, яка не стискується, закон Дарсі згідно з [7] представляється рівнянням

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\Delta P K S}{L \eta}, \quad (1)$$

де dq/dt – швидкість фільтрації, м³/с, визначається як об'ємна витрата рідини q (м³), що протікає за одиницю часу t (с) крізь одиницю площі поперечного перерізу;

S – площа поперечного перерізу, м²;
 ΔP – градієнт тиску, Па, утворюється внаслідок накладання однобічного зовнішнього тиску на зразок;
 K – істинний коефіцієнт фільтрації, м²;
 L – висота/товщина зразка, м;
 η – в'язкість води, (Н·с)/м².

Рівняння (1) надає можливість обчислювати істинний коефіцієнт фільтрації. При виконанні випробувань для обчислення коефіцієнту фільтрації води в бетоні застосовують рівняння (2) – рівняння Дарсі для умов наскрізної фільтрації води [7]

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\Delta H k S}{L}, \quad (2)$$

де ΔH – гідростатичний тиск, м (вимірюється за допомогою п'єзометру), який пов'язаний з ΔP рівнянням (3);

k – коефіцієнт фільтрації, м/с, який пов'язаний з істинним коефіцієнтом фільтрації K рівнянням (4)².

$$\Delta P = \Delta H \rho a, \quad (3)$$

де ρ – густина води, кг/м³;
 a – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²,

$$K = \frac{\eta}{\rho a} k. \quad (4)$$

Проникність бетону визначається загальним об'ємом капілярних пор і залежить від співвідношення вода/цемент (В/Ц) та ступеня розвиненості процесів гідратації цементного каменю. При зменшенні В/Ц від 0,75 до 0,45 і нижче, значення k для бетону у проектному віці знижуються на один або два порядки (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів фільтрації води в бетоні згідно з даними [9]

В/Ц	Вміст повітря, %	Міцність на стиск, МПа	Коефіцієнт фільтрації $k \cdot 10^{-13}$, м/с
0,35	4,0	33,1	0,37
0,45	5,8	26,1	1,26
0,55	7,3	20,0	4,68
0,65	6,8	16,6	8,14
0,75	6,5	10,6	10,90

² Для води при 23 °С $k=9,75 \cdot 10^6$ К [8].

Згідно з даними [10] залежність коефіцієнту фільтрації води від міцності бетону на стиск описується рівнянням

$$k = a (F_c^{28})^{-b}, \quad (5)$$

де F_c^{28} – міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа;

a і b – коефіцієнти.

Для бетонів з низькою пористістю час досягнення сталого руху води може дорівнювати декільком місяцям. Також для досягнення наскрізної фільтрації в зразках щільних бетонів протягом реального часу потребується високий випробувальний тиск, що призводить до колюматції пор повітрям та продуктами руйнування порових оболонок (ефект самогерметизації). В зв'язку з цим відповідно до стандартів [3-5] водонепроникність бетонів з низькою пористістю характеризують глибиною проникнення води. За результатами таких випробувань значення коефіцієнту фільтрації може бути обчислене з застосуванням рівняння Валенти

$$k_v = \frac{x^2 V}{2 \Delta H T}, \quad (6)$$

де k_v – коефіцієнт фільтрації, м/с;

x – глибина проникнення води в зразок, м;

V – об'ємна фракція пор;

T – час, протягом якого прикладається випробувальний тиск, с.

Показник V , який характеризує фракцію дискретних пор, не заповнених водою, за відсутності зовнішнього тиску, визначається як

$$V = \frac{\Delta W}{D S x}, \quad (7)$$

де ΔW – зміна маси зразка протягом випробувань, кг;

D – густина бетону, кг/м³.

Результати випробувань можуть бути надані у вигляді одного з параметрів – x або k_v . При випробуваннях відповідно до стандартів [3, 4] результати надають у вигляді значень x . Обчислення значень k_v прийнято для бетонів, на яких наскрізна фільтрація води не спостерігається [5]; також результати таких розрахунків широко застосовуються при виконанні науково-дослідних робіт для аналізу даних і прогнозування показників якості бетону [9]. Згідно з даними [11, 12] при випробуваннях бетонів зі значеннями міцності на стиск від 35 МПа до 50 МПа було підтверджено, що значення коефіцієнтів фільтрації, що їх отримано відповідно до двох розглянутих вище методів³, корелюють між собою.

Згідно з даними [6], значення « V » (див. (7)) знаходяться в межах від 0,02 до 0,06. З урахуванням цих граничних значень показник $x < 50$ мм дозволяє характеризувати бетон як водонепроникний. При значеннях $x < 30$ мм бетон характеризується як непроникний в агресивних середовищах.

³ Випробування за умов сталого руху води виконували при градієнту тиску 0,7 МПа. Дослідження виконано на зразках бетону, виготовлених у лабораторії.

Згідно з даними [13] залежність глибини проникнення води від міцності бетону на стиск описується рівнянням⁴

$$F_c^{28} = -cx + d, \quad (8)$$

де c і d – коефіцієнти.

Для бетонів, які характеризуються значеннями $k < 1,3 \cdot 10^{-13}$ м/с, доцільно застосовувати метод з визначенням глибини проникнення води [11]. Критерієм попереднього вибору одного з розглянутих методів визначення водонепроникності можуть слугувати результати обчислення за нерівністю (9) [11]:

$$2,3 T^2 + 1,1 (F_c^{28})^2 \leq 10\,400, \quad (9)$$

де T – вік зразків бетону при визначенні водонепроникності, діб.

Якщо ця нерівність виконується, доцільно призначати випробування на водонепроникність за умов сталого руху води.

Параметри контролю і умови випробувань

При випробуваннях за умов сталого руху вимірюється кількість води, що пройшла через водонасичений зразок бетону при нормованому постійному однобічному тиску протягом нормованого часу [2] або протягом виміряного часу [1]. Результати випробувань подаються у вигляді коефіцієнтів фільтрації, обчислених за рівнянням (2). Згідно з [1] випробовують зразки бетону, виготовлені в лабораторії. Величина випробувального тиску становить 1,38 МПа. Після досягнення постійної швидкості фільтрації вимірюють кількість води, що пройшла через зразок протягом виміряного часу. Згідно з [2] випробовують зразки бетону, виготовлені в лабораторії, а також зразки-керни, відібрані з конструкцій. Перед випробуванням зразки насичують деіонізованою водою протягом 72 год. під вакуумом. Величина випробувального тиску становить не більше ніж 40% від міцності зразків бетону на стиск. Після досягнення постійної швидкості фільтрації вимірюють кількість води, що пройшла через зразок протягом 5 год. Слід підкреслити, що при випробуваннях за умов сталого руху води всі вимірювання здійснюють після експериментального підтвердження наявності сталого руху. Критерієм слугує постійна швидкість фільтрації води крізь зразок. Факт досягнення сталого руху води визначається або графічно за утворенням лінійної ділянки залежності «об'єм фільтрату – час випробувань», або за допомогою регресійного лінійного аналізу [1, 2].

Випробування з визначенням глибини проникнення води виконують на водонасичених зразках бетону шляхом накладання нормованого однобічного постійного тиску протягом нормованого часу. Відповідно до вимог [3, 4] воду подають під тиском 0,5 Н/мм² протягом 72 год. Безпосередньо після завершення випробувань зразок розколюють по центру вздовж напрямку подачі води і вимірюють максимальну глибину проникнення води. Результат надають у вигляді середнього арифметичного значення максимальної глибини проникнення води для трьох зразків. Згідно з даними науково-технічної літератури [14] відхилення окремих значень від середнього арифметичного може сягати 100 %.

⁴ Залежності, наведені в рівняннях (5) і (8), були визначені для бетонів після твердіння протягом 28 діб.

Можливості порівняння результатів визначення водонепроникності бетонів за розглянутими методами

За результатами випробувань, наведеними в [15], було встановлено залежність марок бетону по водонепроникності від значень k (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів фільтрації залежно від марок бетону по водонепроникності

Марка бетону по водонепроникності	Коефіцієнт фільтрації k , см/с, для бетону, що випробовується в стані	
	рівноважної вологості (60±5)%	водонасичення
W2	$7 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-9}$
W4	$2 \cdot 10^{-9} - 7 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-10}$
W6	$6 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-10}$
W8	$1 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-11}$
W10	$6 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-11}$
W12	менше ніж $6 \cdot 10^{-11}$	менше ніж $5 \cdot 10^{-12}$

Дані щодо класифікації бетонів при випробуванні в стані рівноважної вологості (графи 1 і 2 табл. 2) внесено в український стандарт [16].

Таким чином, при випробуванні з визначенням глибини проникнення води згідно з [3, 4] бетон може бути віднесений до певної марки по водонепроникності відповідно до вимог [16] на підставі порівняння коефіцієнтів фільтрації k_v і k , де k_v обчислюють згідно з (6). При порівняннях слід розглядати значення k , наведені в графі 3 табл. 2 для бетонів в стані водонасичення, оскільки ця умова є необхідною для застосування рівняння Дарсі при обчисленні значень k .

Література

1. CRD-C 48-92. Standard Test Method for Water Permeability of Concrete (U.S. Army Corps of Engineers).
2. CRD-C 163-92. Test Method for Water Permeability of Concrete Using Triaxial Cell (U.S. Army Corps of Engineers).
3. EN 12390-8:2009. Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure.
4. DIN 1048-5:1991. Testing concrete. Part 5: Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould).
5. NT Method. NT Build 506 (2006). Water Permeability of Water Saturated Concrete.
6. Li Z., Leung C., Xi Y. Structural Renovation in Concrete. – NY: Taylor & Francis, 2009. – 347 p.
7. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. – 392 p.

8. Lamond E.F., Pielert J.H. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. – PA, USA: ASTM International, 2006. – 664 p.
9. Ramachandran V. S., Beaudoin J. J. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques and Applications. – NJ, USA: Noyes Publications, 2001. – 964 p.
10. Bamforth P.B. The Water Permeability of Concrete and its Relationship with Strength // Magazine of Concrete Research. – 1991, V. 43, № 157. – P. 233-241.
11. Chloride Resistance of Concrete. Report of “Cement Concrete & Aggregates”, Australia. – June 2009. – 37 p.
12. Khatri R., Sirivivatnanon V. Methods for the Determination of Water Permeability of Concrete // ACI Materials Journal – 1997, V. 94, No. 3. – P. 257-261.
13. Ashraf W.B., Noor M.A. An Experimental Comparative Study on the Effects of Cement Types on Concrete Properties // 31st Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials. Imperial College London, United Kingdom, 12-13 September 2011. – P. 1-4.
14. Kropp J., Hilsdorf H.K. Performance criteria for concrete durability. RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Report 12 – E & FN Spon, 1995. – 327 p.
15. Лещинский М.Ю. Испытание бетона: Справ. пособие. – М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.
16. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.