



УДК 620. 179. 162

С.О. Ловейкін, інж. КНУБА,
В.І. Ярас, канд. техн. наук, доц. КНУБА

СПОСОБИ ПОБУДОВИ ГРАДУЮВАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ТА ОЦІНКИ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ ПРИ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ МІЦНОСТІ БЕТОНУ НА СТИСК

Актуальність роботи. Основою для проведення контролю міцності бетону на стиск в збірних чи монолітних конструкціях є інформація про випробування серії контрольних зразків, що виготовлялись з тих же замісів бетонної суміші, що і конструкції. Стандартний контроль передбачає оцінку міцності бетону за випробуванням даних зразків на пресі – по суті, це є контроль лише бетонної суміші, з якої виготовляються конструкції. Неруйнівний контроль оцінює міцність бетону в самих конструкціях за виміряними на ньому значеннями непрямого показника, а серія контрольних зразків необхідна для встановлення градювальної залежності між прямим і непрямим показником міцності.

Будь-яке статистичне дослідження починається з формування вибірки, за результатами випробувань якої оцінюються властивості всієї генеральної сукупності. У випадку неруйнівного контролю міцності бетону вибірка проводиться двічі: для побудови градювальної залежності шляхом відбору проб із замісів бетонної суміші; під час вимірювання непрямого показника в генеральній сукупності конструкцій. Основними вимогами до даних вибірок є випадковість, рівномірність по об'єму генеральної сукупності і достатня повнота. Використання неруйнівних методів значно спрощує процедуру контролю у випадку великих об'ємів продукції, що виготовляється за єдиною технологією, а також підвищує його точність (за рахунок вимірювання безпосередньо в конструкціях), але тільки за умови, що градювальна залежність будується на основі коректної вибірки і за методикою, що описана в стандартах на неруйнівні методи контролю міцності бетону [1, 2]. Проте окремі важливі положення даної методики не конкретизовані в стандартах, і досліднику доводиться приймати власні рішення на етапі побудови градювальної залежності, від яких, як показує досвід неруйнівного контролю на багатьох об'єктах будівництва, точність контролю може помітно змінюватись.

Метою роботи є дослідження способів побудови градювальної залежності та оцінки її параметрів для ультразвукового методу поверхневого і наскрізного прозвучування, а також методу ударного імпульсу, оминаючи питання правильності формування серії зразків. Дослідження проводиться на основі випробування серії контрольних зразків, що були виготовлені під час стандартного контролю міцності бетону збірних конструкцій на заводі «ДБК-3», а також бетону монолітних конструкцій на будівельному майданчику.

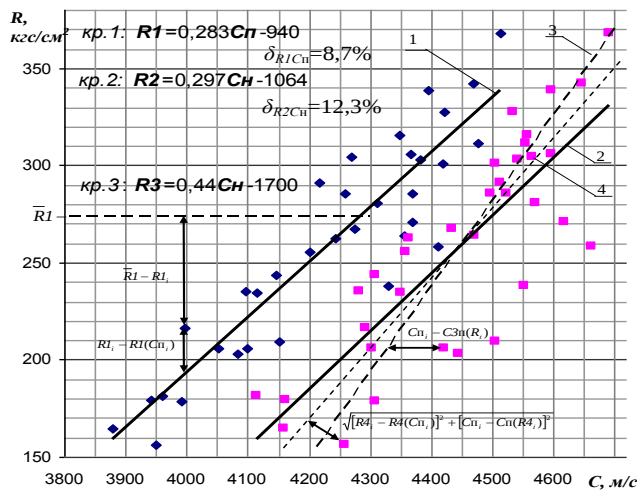
Виклад основного матеріалу. Градювальна залежність між міцністю бетону на стиск R та непрямим показником X (рис.1), що згідно стандартів [1, 2] встановлюється аналітичним методом найменших квадратів (МНК), є основою для проведення всього наступного статистичного аналізу. Розглянемо далі окремі аспекти цього аналізу.

Лінійність градювальної залежності. В МНК користуються кривими простого виду, які шляхом перетворення змінних можна звести до лінійної залежності. Даний підхід цілком задовольняє випадку неруйнівного контролю міцності, оскільки, як показує досвід багатьох експериментальних робіт, розподіли точок мають досить велике розсіяння і плавний характер «викривлення» [3].

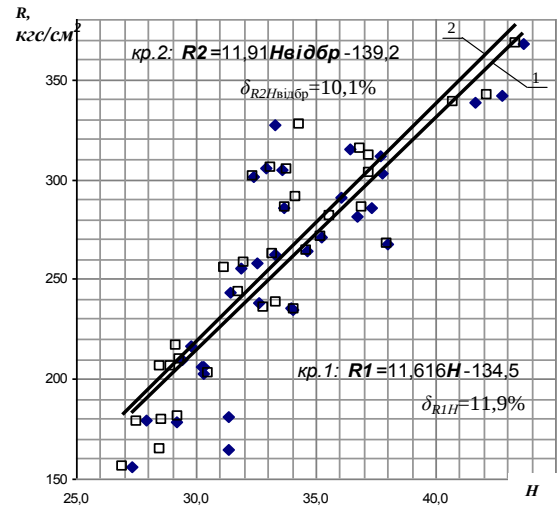
Основні оціночні параметри. Сума $\Sigma \Delta^2_{RX} = \Sigma (R_i - R(X_i))^2$ – критерій оптимальності кривих 1 та 2 на рис.1, а при їх побудові по МНК. Через дану суму виражаються такі параметри як залишкова дисперсія і залишкове середньоквадратичне відхилення міцності:



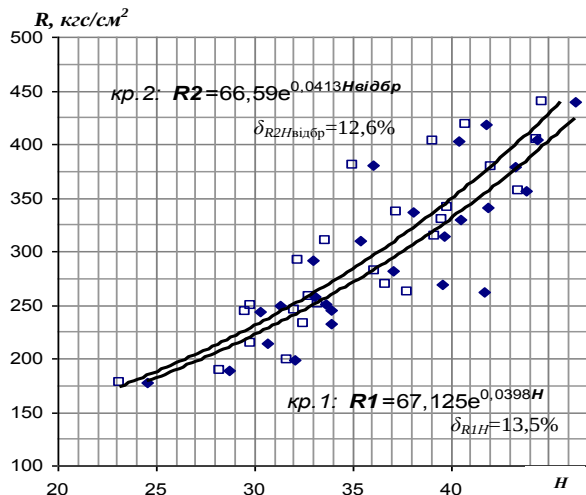
$$D_{RX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{R} - R(X_i))^2, \quad S_{RX} = \sqrt{D_{RX}}.$$



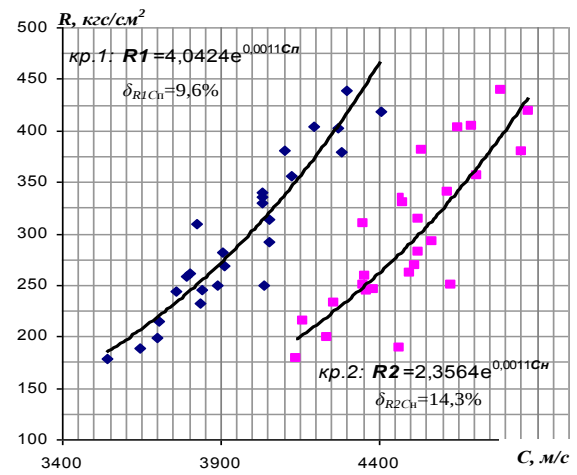
а).



б).



в).



г).

Рисунок 1. Дані випробувань сукупності зразків з бетону монолітних (а, б) та збірних (в, г) конструкцій: R – міцність на стиск; H – показник ударного імпульсу, $C_{п}$, $C_{н}$ – швидкості розповсюдження поверхневих та наскрізних ультразвукових хвиль.

Коефіцієнт детермінації $d_{RX} = 1 - (D_{RX} / D_R)$ – стат. показник, який у повному коливанні R в межах вибірки оцінює (для даної функціональної залежності) відсоток коливання за рахунок впливу виключно X . Зазвичай користуються коефіцієнтом кореляції $\rho_{RX} = \sqrt{d_{RX}}$.

Похибка оцінки міцності $\delta_{RX} = 100 \cdot S_{RX} / \bar{R}$ оцінює правомірність визначення $R(X)$ в даній вибірці за встановленою функціональною залежністю аналогічно коефіцієнту варіації $\delta_R = 100 \cdot S_R / \bar{R}$, що оцінює неоднорідність деякого параметру (R) у вибірці. Згідно стандартів [1, 2] градувальну залежність допустимо використовувати, коли $\delta_{RX} \leq 12\%$ при побудові по середнім значенням, і $\delta_{RX} \leq 15\%$ – при побудові по окремим зразкам.

Критерієм вибору конкретної кривої для деякої вибірки з однаковою ефективністю буде що d_{RX} , що δ_{RX} , а по суті – D_{RX} (або S_{RX}), оскільки параметри D_R і $\bar{R}$ для даної вибірки залишаться постійними при використанні різних кривих.

Особливістю розглянутого типу регресійної кривої, рівняння якої запишемо як

$$R = a_{RX} + b_{RX}X,$$

є виконання умови $D_R > D_{R(X)}$, так що дисперсія реальної міцності в вибірці $D_R = D_{R(X)} + D_{RX}$ [4]. Якщо ж регресійна крива будується за умови, що X – залежна змінна, а R – незалежна, то критерієм побудови відповідної прямої

$$R' = a_{XR} + b_{XR}X$$

буде сума $\Sigma \Delta_{XR}^2 = \Sigma (X_i - X(R'_i))^2$, коефіцієнт регресії b_{XR} буде більшим за b_{RX} (кр.4 та кр.3 на рис.1, а), і виконуватимуться співвідношення: $D_{R'(X)} > D_R$; $D_R = D_{R'(X)} - D_{XR}$.

Криві обох цих типів однаково точно оцінюють параметри $\bar{R}$, D_R . При оцінці міцності в окремій одиниці продукції слід зважати на те, що крива « b_{RX} » завжди даватиме значення, більш наближене до рівня $\bar{R}$, ніж крива « b_{XR} ». Крива типу « b_{RX} », що регламентована в стандартах [1, 2], характерна тим, що визначена по ній залишкова дисперсія D_{RX} є найменшою по відношенню до залишкових дисперсій будь-яких інших можливих кривих, через що інші параметри оцінки функціональної залежності теж набувають найбільш оптимальних значень.

Існує також третій спосіб побудови градуовальної залежності [4] – використовуючи криву ортогональної регресії (кр.5 рис.1,а), що знаходиться з умови мінімуму

$$\Sigma \Delta_{\text{орт}}^2 = \Sigma \left[\sqrt{(R'_i - R''(X_i))^2 + (X_i - X(R'_i))^2} \right]^2. \text{ Вона займає середнє положення: } b_{RX} > b_{\text{орт}} > b_{XR} \text{ і}$$

характерна тим, що за визначеними по ній значенням $R''(X_i)$ одразу оцінюється реальна дисперсія розподілу міцності: $D_R = D_{R''(X)}$. Враховуючи останню обставину, дану криву більш доцільно використовувати при оцінці міцності в окремій одиниці продукції, ніж криву типу « b_{RX} » чи « b_{XR} ».

Відбраковування при вимірюванні одиничних результатів. Вимірювання будь-якого параметру в бетоні – це оцінка реакції матеріалу на певного роду фізичне збурення, і оскільки при вимірюванні показника неруйнівного методу (X) збуренню підлягає обмежений об'єм зразка, то для оцінки непрямого показника в усьому зразку проводять серію вимірювань на різних його ділянках, визначаючи середнє значення. Усереднення слід здійснювати з врахуванням особливостей процесу вимірювання конкретного неруйнівного методу – оскільки для кожного методу існують свої шкідливі впливи, що не несуть в собі корисної (з точки зору оцінки міцності) інформації про фізико-механічні властивості бетону. Розглянемо далі різні за принципом вимірювання неруйнівні методи, враховуючи їх особливості, що детально описані в роботі [5].

Методами поверхневої твердості оцінюється, по-суті, міцність цементного каменю, яка є одним з основних факторів, що визначає величину R , і тому тісно корелює з цим параметром. Крупні пори і включення крупного заповнювача при знаходженні в зоні удару дають різкі відхилення вимірюваного показника, тому перед визначенням середнього значення дуже важливим є виділення нетипових, аномальних результатів. Натомість в ГОСТ на дані методи не зазначено, яким чином необхідно проводити усереднення – це визначається у відповідності до інструкції по експлуатації приладу.

В приладі «Оникс» виробництва фірми «Интерприбор» запрограмована процедура виключення «викидів», після якої обчислюється середньоарифметичне в серії, причому алгоритм відбраковування не описаний. На рис.1,б,в приведені дані випробувань приладом «Оникс» зразків з об'єкту «НСК» і «ДБК-3», де крива 1 побудована без відбраковування «викидів». Завдяки введеній процедурі відбраковування похибка оцінки міцності δ_{RX} зменшується з 11,9% до 11,5% для зразків з бетону монолітних конструкцій і з 13,5% до 12,9% для зразків з бетону збірних конструкцій.

Алгоритм відбраковування випадкових похибок вимірювання базується, як правило, на основі припущення про нормальність розподілу і полягає у встановленні допустимого діапазону відхилення від середнього $\Delta_X = \pm t_{n(P)} \cdot S_X$, де $t_{n(P)}$ – квантиль рівня імовірності P , що знаходиться за таблицею. У випадку малої вибірки ($n \leq 30$) користуються аналогічною квантильною оцінкою розподілу Ст'юдента [6]: $\Delta_X = \pm t_{cm(P)} \cdot S_X$. Якщо для даних вимірювання методом ударного імпульсу, що наведені на рис.1, б, в застосувати відбраковування за



квантильною оцінкою розподілу Ст'юдента при $P=0,95$, отримаємо криві 2 на відповідних рисунках, які дають ще більш точну оцінку міцності, ніж при алгоритмі відбраковування «з приладу» ($\delta_{RX}=10,1\%$ для сукупності зразків з бетону монолітних конструкцій і $\delta_{RX}=12,6\%$ – для зразків з бетону збірних конструкцій).

При одиничному вимірюванні *ультразвуковими методами* збуренню піддається велика частина зразку, тому неоднорідність структури бетону на мезо-рівні не викликає великого розсіювання серії випробувань і не призводить до виникнення суттєвих «викидів» (на відміну від ударного методу). Дані явища виникають через методичні похибки, що носять випадковий характер. Ними є похибка вимірювання бази прозвучування (особливо для наскрізного методу) та неякісний контакт між поверхнями датчика і бетону (відсутність достатньої кількості мастильної речовини при вимірюванні без «концентраторів» чи недостатня сила притискання датчиків). В поверхневому методі дані методичні похибки є значно меншими, ніж в наскрізному, через високу стабільність бази і можливість використання концентраторів. Великий вплив даних методичних похибок при наскрізному «прозвучуванні» підтверджується результатами експериментів, які свідчать (рис.1, а, з), що за однакових умов випробування похибка поверхневого методу значно менше, ніж наскрізного ($\delta_{RCH}=9,6\%$ і $\delta_{RCH}=14,3\%$ для зразків з бетону монолітних конструкцій; $\delta_{RCH}=8,7\%$ і $\delta_{RCH}=12,3\%$ для збірних конструкцій) – не дивлячись на теоретичні передумови кращої кореляції для наскрізного методу [5].

Висновки.

Для оцінки неруйнівними методами міцності бетону на стиск в окремих конструкціях більш доцільним будувати криву ортогональної регресії, що даватиме трохи більшу похибку оцінки міцності δ_{RX} , ніж тип кривої, що регламентований в стандартах [1, 2] для оцінки статистичних параметрів розподілу міцності, але зате визначена міцність буде більш наближеною до реальної міцності на даній ділянці конструкції.

Відбір обстежуваних сукупностей зразків не контролювався. Цілком можливо, що вибірка не є репрезентативною по відношенню до генеральної сукупності конструкцій і саме тому спостерігаються високі значення похибок δ_{RX} . Однак метою роботи було дослідити методи зменшення даної похибки незалежно від природи вибірки. Для ударних методів простежується тенденція зменшення похибки δ_{RH} при відбраковуванні «викидів». Причому відбраковування за квантильною оцінкою розподілу Ст'юдента дає вищу точність, ніж при алгоритмі, що введений в прилад «Оникс». Для ультразвукових методів простежується значно менша точність наскрізного методу в порівнянні з поверхневим, що пояснюється більш сильним впливом методичних похибок вимірювання.

Література

1. ГОСТ 17624–87 “Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности”.
2. ГОСТ 22690–88 “Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля”.
3. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетона. – М.: Стройиздат, 1974.
4. Методические рекомендации по статистическому контролю прочности бетона с учетом эффективности испытаний. – К.: НИИСК, 1981.
5. Дослідження зв'язків параметру міцності бетону на стиск з непрямыми показниками різних неруйнівних методів / Городжа А.Д., Ловейкін С.О. Депонований рукопис. Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2005. – 22с.
6. Новицкий П.В., Зограф А.И. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.: ил.