



УДК 621.24

• © В.П. Редченко, докт. техн. наук, зав. відділу (Дніпропетровський комплексний відділ ДП “ДерждорНДІ”)

# МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ МОСТІВ

*Анотація.* Наведено метод визначення постійних напружень у залізобетонних конструкціях мостів.

*Ключові слова:* міст, залізобетонні конструкції, постійні навантаження, напруження.

*Анотация.* Представлено метод определения постоянных напряжений в железобетонных конструкциях мостов.

*Ключевые слова:* мост, железобетонные конструкции, постоянные нагрузки, напряжения.

*Annotation.* In the article they write about the method of definition of residual stresses in concrete constructions of bridges.

*Keywords:* bridge, concrete constructions, constant a load, residual stresses.

## Вступ

Для визначення технічного стану мосту необхідно знати напружений стан його конструкцій від постійно діючих навантажень [1 – 3]. Величина цих напружень безпосередньо впливає на результати оцінки фактичної вантажопідйомності мосту [4, 5]. У випадку попередньо напружених залізобетонних конструкцій важливим є знання фактичних напружень обтиснення бетону. Для стійок опор у вигляді оболонки із заповненим ядром важливою є інформація про розподіл напружень, тобто про ступінь включення ядра стійки в сумісну роботу [6]. Розрахункові методи не завжди дають можливість правильно оцінити напружений стан конструкції. Саме тому визначення фактичних напружень в конструкції від постійних навантажень шляхом інструментальних вимірювань є важливою та актуальною проблемою.

Одним з методів визначення фактичних напружень в конструкції від постійно діючих навантажень є метод висвердлювання отвору та вимірювання зміни напружень поблизу нього [7, 8]. При цьому важливим є точне наклеювання тензодатчиків навколо отвору під певними кутами та на певній відстані [9]. Метод добре зарекомендував себе для металевих конструкцій, але для залізобетону його застосування викликає проблеми, пов'язані з неоднорідною структурою бетону. Якщо для металу

висвердлюються отвори діаметром та глибиною 5 – 8 мм, то для бетону ці розміри повинні бути на порядок більшими – тобто 50 – 80 мм. Для тонкостінних конструкцій, чи для армованих конструкцій, такі локальні руйнування часто є неможливими. У попередній статті на цю тему [10] було представлено теоретичні обґрунтування методу експериментального визначення постійних напружень в залізобетонних конструкціях мостів шляхом несуттєвого локального руйнування бетону. *Метою цієї статті* є ознайомлення широкого загалу спеціалістів з подальшими результатами робіт.

## Основна частина

Будь-яке локальне руйнування матеріалу конструкції викликає зміни напруженого стану поблизу цього руйнування, що може бути використаним для отримання інформації про початкові напруження (до руйнування). Теоретичні дослідження зміни напруженого стану були виконані в програмному середовищі, що реалізує метод скінчених елементів (МСЕ) [10].

На **рис. 1** наведено графік відносної зміни напружень в пластині (МСЕ-модель) відносно їх початкових значень ( $F/F_0$ ) залежно від відносної відстані до прорізу  $L/h$ , де  $L$  – відстань від прорізу. Наклеївши тензодатчик поблизу наміченого прорізу, можна, після виконання прорізу, за виявленими

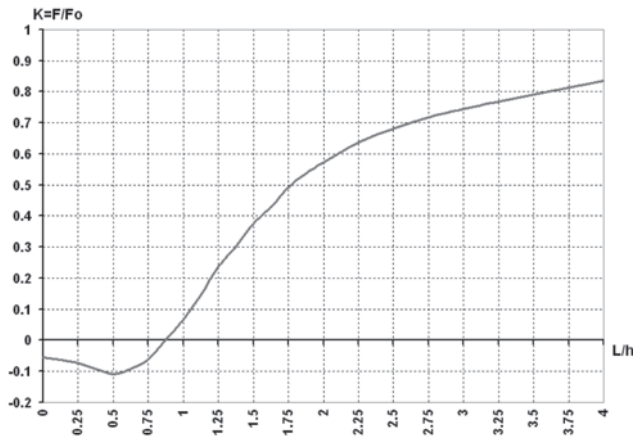


Рис. 1. Графік відносної зміни напружень ( $F / F_0$ ) залежно від відносної відстані від прорізу ( $L / h$ , де  $L$  – відстань від прорізу,  $h$  – глибина прорізу)

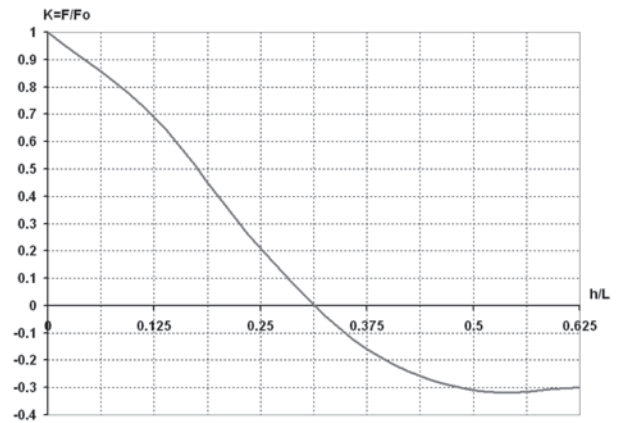


Рис. 2. Графік відносної зміни напружень ( $F / F_0$ ) для точки посередині між прорізами залежно від відносної глибини прорізу ( $h / L$ )

змінами визначити початкові напруження. При цьому розрахунки залишаються досить складними, а їх результат залежить від розмірів прорізу, розмірів датчика та його розташування відносно прорізу.

На рис. 2 наведено графік відносної зміни напружень в пластині для точки посередині між прорізами залежно від відношення глибини прорізів до відстані між ними. У цьому випадку, зі збільшенням відношення глибини прорізів до відстані між ними зміна напружень на поверхні між прорізами зростає аж до зміни знаку напружень на протилежний. При відносній глибині прорізу  $h/L \approx 0,3$  ( $L$  – відстань між прорізами) напруження в точці посередині між прорізами повністю зникають. У випадку з двома прорізами можна робити прорізи меншої глибини, ніж у випадку з одним прорізом, а сам датчик при цьому буде на більшій відстані від прорізів. Відстань від краю прорізу до датчика є суттєвим чинником, оскільки при виконанні прорізу бетон поблизу нагрівається і чим ближче до прорізу, тим більша температура нагріву.

Практичні роботи виконують в такій послідовності:

- намічають ділянку конструкції, де потрібно визначити постійні напруження стиснення і де можна зробити прорізи глибиною до 20 мм;
- наклеюють тензодатчик та виконують початкові вимірювання опору датчика;
- виконують прорізи;
- після певного часу (для охолодження зони прорізів) виконують заміри опору датчика;
- за різницею опору датчика до та після прорізу встановлюють зміну напружень ( $\Delta F$ ) на ділянці вимірювання;
- за виміряною зміною напружень множенням на коефіцієнт приведення ( $K$ ) визначають напруження від постійних навантажень.

Етап визначення коефіцієнта приведення є найбільш складним і впливовим на результат, оскільки він окрім геометричних залежностей, наведених графіками на рис. 1 та рис. 2, також залежить від багатьох інших факторів впливу, і деякі з них можуть бути невизначені. Наприклад: проріз виконують дисковою пилою та на скінченій довжині (нерівномірна глибина прорізу); в зоні прорізів може бути арматурний стрижень чи крупний щебінь тощо. Пропонується коефіцієнт приведення визначати (уточнювати) за експериментальними даними безпосередньо на об'єкті досліджень.

Мости на відміну від багатьох інших будівельних споруд працюють не лише на постійні навантаження, а ще й на тимчасові. Саме тому додаткове вимірювання зміни опору тензодатчика від певного (випробувального) тимчасового навантаження до і після виконання прорізу дає необхідну інформацію про ступінь виключення ділянки бетону із загальної роботи масиву бетону, а отже, дає можливість визначити коефіцієнт приведення за такою формулою:

$$K = \frac{F_0}{F_0 - F_1}, \quad (1)$$

де  $F_0$  – напруження від випробувального навантаження до виконання прорізу;

$F_1$  – напруження від випробувального навантаження після виконання прорізу.

Постійно діючі напруження ( $P$ ) визначають як:

$$P = K \cdot \Delta F, \quad (2)$$

де  $\Delta F$  – величина зміни напружень за показами до і після виконання прорізу.

У формулі (1) параметри  $F_0$  та  $F_1$  визначені за показами одного і того ж датчика, отже, вони можуть бути представлені як в абсолютних,

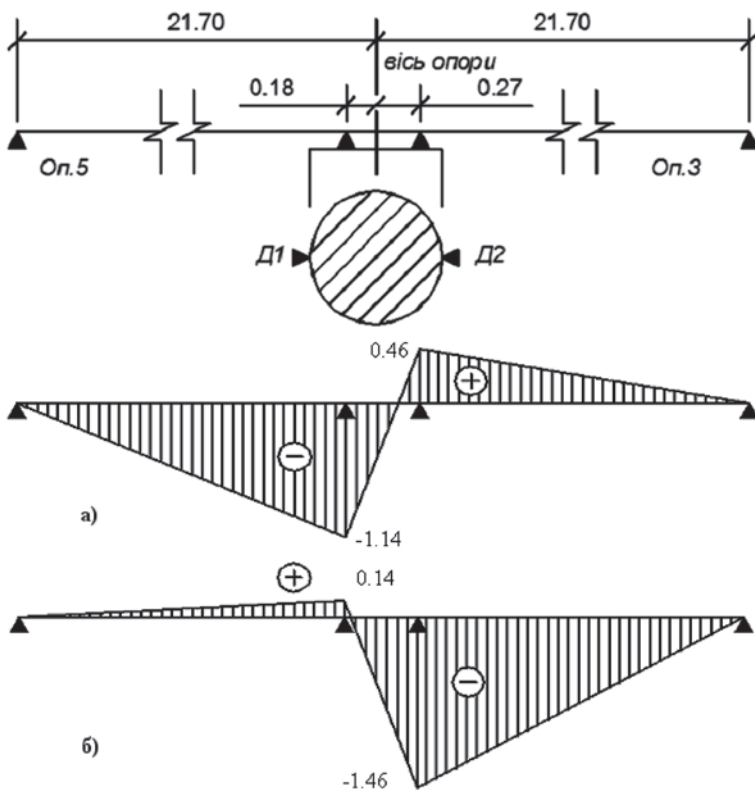


Рис. 3. Схема обпирання прогонових будов на опору та лінії впливу для напружень в точках Д1 (а) та Д2 (б)

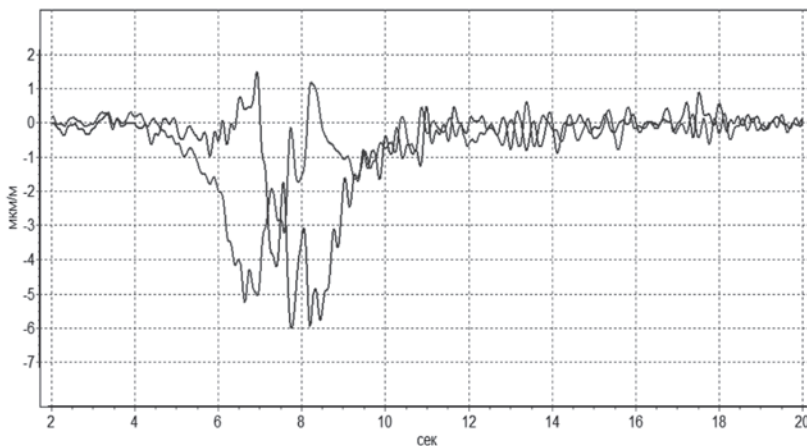


Рис. 4. Графіки показів датчиків при проїзді вантажівки над опорою

так і у відносних значеннях. Саме тому, якщо використовується випадкове випробувальне навантаження з різною масою, то можна скористатися додатковим реперним датчиком. Реперний датчик встановлюють поблизу робочого датчика (але на достатній відстані від прорізу – як мінімум  $10h$ ) так, щоб реакції обох датчиків на тимчасове навантаження були прямо пропорційними. У цьому випадку  $F_0$  та  $F_1$  визначають як відносні величини до показів реперного датчика і значення випро-

бувального навантаження може бути довільним (для мостів це випадковий проїзд транспорту).

### Результати натурального експерименту

Натурний експеримент із визначення постійних напружень проводили для стійки проміжної опори мосту. Опора виконана у вигляді плоскої рами – дві стійки-колони об'єднані згори ригелем. На опорі спираються балкові розрізні прогонові будови з розрахунковим прогоном 21,7 м. За результатами натурних обмірів обпирання прогонових будов на опору виконано з ексцентриситетом (рис. 3).

Тензодатчики (база 10 мм) наклеювали на поверхню стійки в діаметрально протилежних точках вздовж осі мосту (точки Д1 та Д2, рис. 3). Лінії впливу для вертикальних напружень у вказаних точках наведені на рис. 3-а та рис. 3-б. Графіки (реєстраційний комплекс “Spider 8”) показів датчиків під час проїзду над опорою випадкової вантажівки наведені на рис. 4. Датчик Д1 – реперний датчик, датчик Д2 – робочий. За відносними показами максимальних квазістатичних складових  $F_0 = 1,16$ . Проріз у бетону глибиною біля 10 мм виконували поблизу датчика Д2 (приблизно 20 мм від середини датчика). За геометричними характеристиками прорізу (рис. 1) коефіцієнт приведення має бути близьким до 2. На рис. 5 показано діаграму зміни показів (мкм/м) датчика Д2 під час виконання прорізу. Реєстрацію показів виконували неперервно, тому добре видно ділянку, де виконується проріз та ділянку охолодження (стабілізація показів).

За результатами вимірювань отримано зміну відносних деформацій  $22 \cdot 10^{-6}$ ,

що для модуля пружності бетону  $32 \cdot 10^3$  МПа відповідає зміні напружень  $F_0 = 0,704$  МПа ( $7,04$  кг/см<sup>2</sup>).

Графіки показів робочого та реперного датчиків під час проїзду над опорою випадкової вантажівки вже після виконання прорізу наведені на рис. 6. За відносними показами квазістатичних складових  $F_1 = 0,62$ . За формулою (1) коефіцієнт приведення  $K = 2,15$ , а отже, вертикальні напруження в точці Д2 від постійних навантажень мають значення  $P = K \cdot \Delta F = 2,15 \cdot 0,704 = 1,514$  МПа. За розрахунками

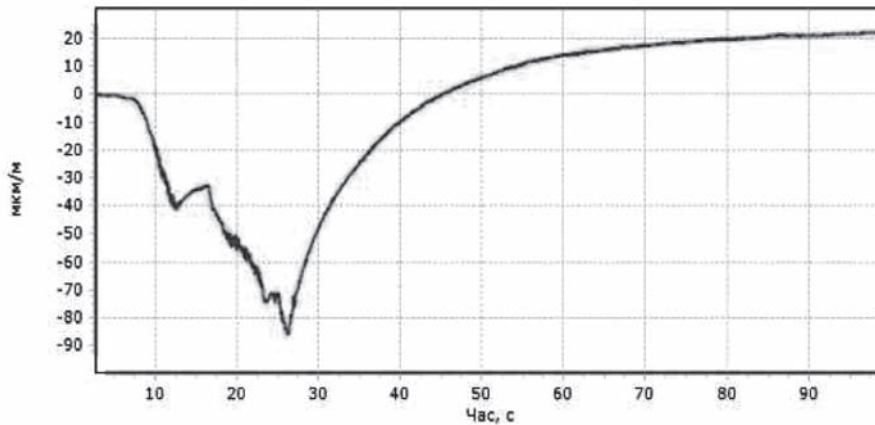


Рис. 5. Діаграма зміни відносних деформацій (мкм/м) в бетоні стійки мостової опори (односторонній проріз)

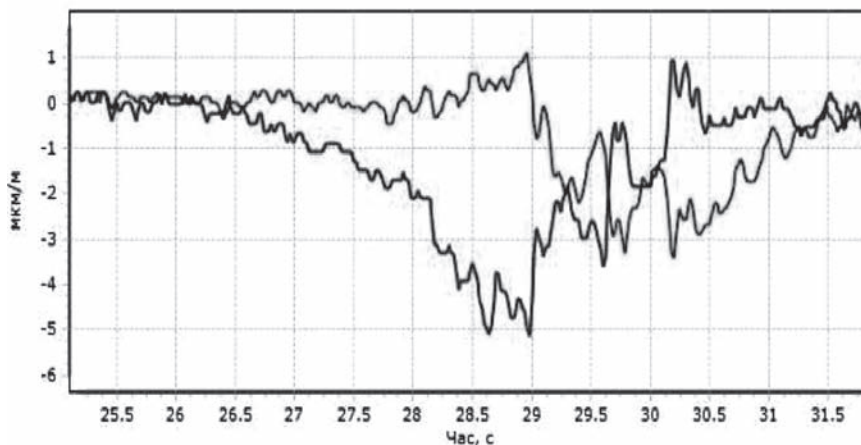


Рис. 6. Графіки показів датчиків при проїзді вантажівки над опорою після виконання прорізу біля одного з датчиків

(визначення ваги прогонових будов та опори через натурні обміри конструкцій і питому вагу їх матеріалів) напруження в стійці опори для точки Д2 становлять біля 1,7 МПа.

#### Висновки

У результаті виконаних досліджень отримані нові наукові результати, а саме:

встановлено залежності у зміні напруженого стану по поверхні бетонного масиву при виконанні неглибокого щілинного прорізу;

запропоновано удосконалений алгоритм визначення початкових напружень в бетоні за їх зміною на поверхні бетону при виконанні щілинного прорізу, який включає визначення коефіцієнта приведення за результатами натурального експерименту.

Втілення в практику розробленого методу дозволить більш точно визначати технічний стан залізобетонних мостів. За результатами виконаного натурального експерименту було уточнено технічний стан опори мосту та надані рекомендації з її ремонту, про що організації, яка займається утриманням даного мосту було направлено технічний звіт.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Введ. 2009-11-11. – К.: Мін регіон буд. України, 2009. – 73 с.

2. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Текст]. – Введ. 2010-03-01. – К.: Мін регіон буд. України, 2009. – 66 с.

3. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування [Текст]. – Введ. 2010-03-01. – К.: Мін регіон буд. України, 2009. – 42 с.

4. Посібник до ДБН В.2.3-6:2010. Мости та труби. Обстеження і випробування [Текст]. – К.: ДерждорНДІ, 2010. – 204 с.

5. ДСТУ-Н Б В.2.2-23:2009. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів [Текст]. – Введ. 2009-11-11. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 49 с.

6. Редченко, В. П. Температурные трещины в колоннах мостовых опор [Текст] / В.

П. Редченко // Будівництво: Зб. наук. пр. ДНУЗТ ім. академіка В.Лазаряна. – 2002. – Вип. 11. – С. 89–93.

7. Rendler, N. J. Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses [Текст] / N. Rendler, I. Vignes // Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis. – Vol. XXIII, No.2. – 1966. – P. 557–586.

8. Witt, F. A Comparison of Residual Stresses Measuring Using Blind-hole Drill, Abrasive Jet, Trepan Ring [Текст] / F. Witt, F. Lee, W. Rider // Presented at Society for Experimental Stress Analysis Meeting. – Dearborn, Michigan, 1981.

9. Dey, H. C. An assessment of residual stresses on 316LN SS machined plates by hole-drilling strain-gage method [Текст] / S.K. Albert, A.K. Bhaduri // International Journal of Materials and Product Technology. – Vol. 43, No.1-4. – 2012 – P. 134–143.

10. Редченко, В. П. Визначення постійних напружень в залізобетонних конструкціях мостів / В. П. Редченко // Автошляховик України. – 2013. – № 5. – С. 45–48.