

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.072

В. П. РЕДЧЕНКО^{1*}

^{1*} Дніпропетровський комплексний відділ, Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна», вул. Батумська, 11, Дніпропетровськ, Україна, 49074, тел. +38 (050) 413 89 09, ел. пошта rvp50@meta.ua

ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Мета. Актуальним для мостів, що експлуатуються, є питання визначення напруженого стану конструкцій від постійно діючих навантажень. Для рішення цього питання пропонується визначати вказані напруження методом несуттєвого локального руйнування, який необхідно удосконалити. **Методика.** Теоретичні дослідження виконувалися шляхом моделювання методом скінченних елементів різних варіантів локального руйнування напруженого бетону. Результати теоретичних досліджень були перевірені проведенням натурального експерименту. **Результати.** На основі аналізу теоретичних досліджень були сформульовані основні принципи практичної реалізації методу визначення постійно діючих напружень для залізобетонних конструкцій мостів шляхом виконання неглибоких прорізів в напруженому бетоні. Для перевірки результатів теоретичних досліджень було виконано натурний експеримент. **Наукова новизна.** Встановлено залежності зміни 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. **Практична значимість.** Втілення в практику розробленого методу дозволить більш точно визначати технічний стан залізобетонних мостів. За результатами натурального експерименту було уточнено технічний стан опори мосту та надані рекомендації з її ремонту, про що організація, яка займається утриманням даного мосту було направлено технічний звіт.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, постійні навантаження, напруження

Проблема

При визначенні технічного стану мосту важливу роль відіграє етап визначення напруженого стану конструкцій від постійно діючих навантажень [1, 2, 3]. Значення напружень від постійних навантажень напряму впливає на результати оцінки фактичної вантажопідйомності мосту [4, 5]. Для оцінки стану попередньо напружених залізобетонних конструкцій важливим є визначення фактичних напружень обтиснення бетону. Для стійких опор у вигляді оболонки із заповненим ядром важливою є інформація про розподіл напружень тобто про ступінь включення ядра стійки в сумісну роботу [6]. В зазначених випадках 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 найбільш розповсюджених методів визначення фактичних напружень в конструкції від постійно діючих навантажень є метод висвердлювання неглибокого отвору та вимірювання зміни напружень поблизу зробленого отвору [7, 8]. При цьому важливим є точне наклеювання тензодатчиків навколо отвору під певними кутами та на певній відстані [9]. Також треба точно висвердлювати отвір певного діаметру та певної глибини. Фірми, які виготовляють тензодатчики, виготовляють також і розетки датчиків, де вони вже відповідно розміщені відносно центру отвору, при цьому слід використовувати спеціальні дрилі з точною (мікрометричною) подачею свердла. Метод добре зарекомендував себе для металевих конструкцій, але для бетону (залізобетону) його застосування викликає певні 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

© В. П. Редченко, 2013

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

50...80 мм. Для тонкостінних конструкцій, чи для армованих конструкцій, такі локальні руйнування часто є неможливими.

Результати досліджень

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 були виконані в програмному середовищі, що реалізує метод скінчених елементів. Розглядалася рівномірно стиснута пластина, в якій робився щільний проріз глибиною h . Розміри пластини вибрані достатньо великі у порівнянні з глибиною прорізу, щоб картина напружень на її границях не змінювалася при виконаному прорізі. На рис. 1 представлено графік залишку напружень в пластині відносно їх початкових значень (F / F_0) в залежності від відносної відстані до прорізу L / h .

Цілком зрозуміло, що наклеївши тензодатчик поблизу наміченого прорізу можна після виконання прорізу за виявленим змінами визначити початкові напруження. При цьому розрахунки залишаються досить складними, а їх результат залежить від розмірів прорізу, розмірів датчика та його розташування відносно прорізу.

Оцінимо практичну сторону вимірювань. Найбільш сприятливою зоною для вимірювань є ділянка між 0,5 та 1,25 L / h . Якщо взяти тензодатчик довжиною 20 мм, то виходячи з цих величин глибина прорізу повинна бути 27 мм, а край датчика буде на відстані 13 мм від прорізу. Більші розміри тензодатчика відповідно вимагатимуть і більшої глибини прорізування бетону.

Також було розглянуто зміну напружень на ділянці між двома прорізами.

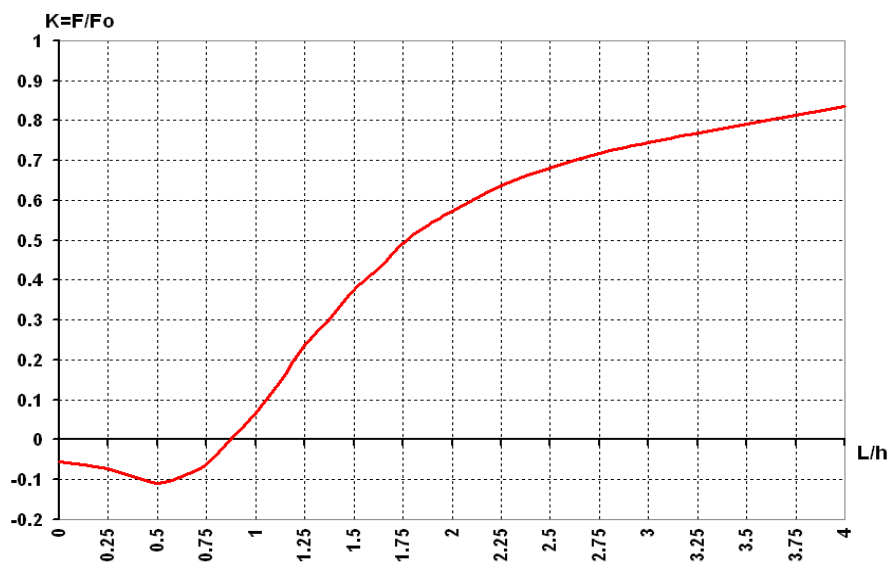


Рис. 1. Графік відносної залишки напружень (F / F_0) в залежності від відносної відстані від прорізу (L / h , L – відстань від прорізу, h – глибина прорізу)

В 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. На рис. 2 представлено графік зміни напружень в пластині для точки посередині між

прорізами в залежності від відношення глибини прорізів до відстані між ними.

Оцінимо практичну сторону вимірювань випадку з двома прорізами. Найбільш сприятливою умовою для вимірювань є відношення $h / L \approx 0,3$. Якщо робити проріз глибиною 20 мм, то виходячи з цих величин відстань між прорізами повинна бути 60 мм, а край датчика довжиною 20 мм будуть на відстані 20 мм від прорізів.

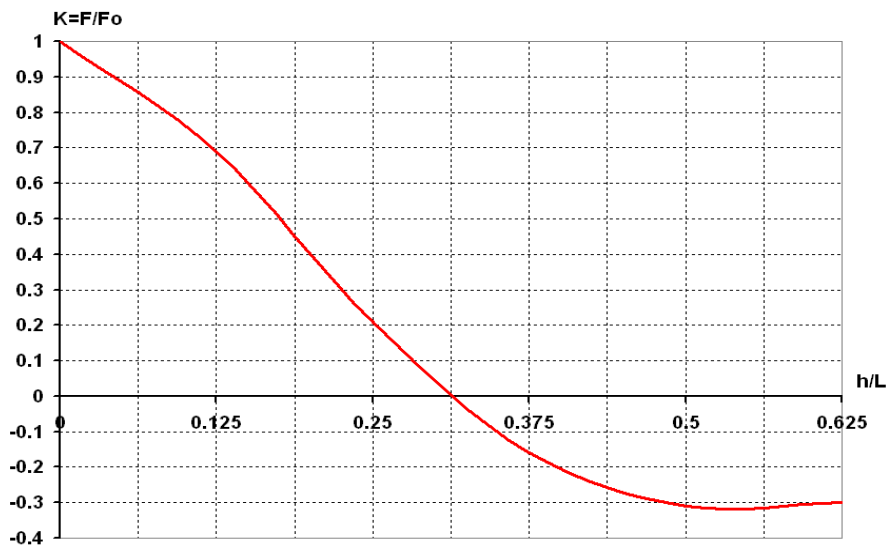


Рис. 2. Графік відносної зміни напружень (F / F_0) для точки посередині між прорізами в залежності від відносної глибини прорізу (h / L)

Як бачимо, 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.

Таким чином, маємо наступну послідовність робіт:

- намічається ділянка конструкції, де потрібно визначити постійні напруження стиснення і де можна зробити прорізи глибиною до 20 мм;
- наклеюється тензодатчик та виконуються початкові вимірювання опору датчика;
- виконується прорізи;
- після певного часу (для охолодження зони прорізів) виконуються заміри опору датчика;
- за різницею опору датчика до та після прорізу встановлюється зміна напружень (ΔF) на ділянці вимірювання;
- за виміряною зміною напружень множенням на коефіцієнт приведення (K) визначаються напруження від постійних навантажень.

Етап визначення коефіцієнту приведення є найбільш складним та впливовим на результат, оскільки він окрім геометричних залежностей, які представлені графіками на рис. 1 та 2, також

залежить від багатьох інших факторів впливу і деякі з них можуть бути невизначені. Наприклад: проріз виконується дисковою пилкою та на скінченій довжині (нерівномірна глибина прорізу); в зоні прорізів може бути арматурний стрижень чи крупний щебінь і т.п. 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 і дає можливість визначити коефіцієнт приведення за наступною 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) визначаються як:

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

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

де ΔF – 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 так і у відносних значеннях. Саме тому, якщо використовується випадкове випробувальне навантаження з різною масою, то можна скористатися додатковим реперним датчиком. Реперний датчик встановлюється поблизу робочого датчика (але на достатній відстані від прорізу – як мінімум $10h$) так, щоб реакції обох датчиків на тимчасове навантаження були прямо пропорційними. В цьому випадку F_0 та F_1 визначаються як відносні величини до показів реперного датчика і значення випробувального навантаження може бути довільним (для мостів це випадковий проїзд транспорту).

Як приклад, розглянемо натурний експеримент по визначенню постійних напружень в стійці проміжної опори мосту. Опора виконана у вигляді плоскої рами – дві стійки-колони об'єднані поверху ригелем. На опорі спираються балкові розрізні прогонові будови з розрахунковим прольотом 21,7 м. За результатами натурних обмірів обпирання прогонових будов на опорі виконано з ексцентриситетом (рис. 3).

Тензодатчики (база 10 мм) наклеювалися на поверхню стійки в діаметрально протилежних точках вздовж осі мосту (точки Д1 та Д2 див. рис. 3). Лінії впливу для вертикальних напружень у вказаних точках представлені на рис. 3, а та б. Графіки (реєстраційний комплекс «Spider 8») показів датчиків під час проїзду над опорою випадкової вантажівки представлені на рис. 4. Датчик Д1 – реперний датчик, датчик Д2 – робочий. За відносними показами максимальних квазістатичних складових $F_0 = 1,16$.

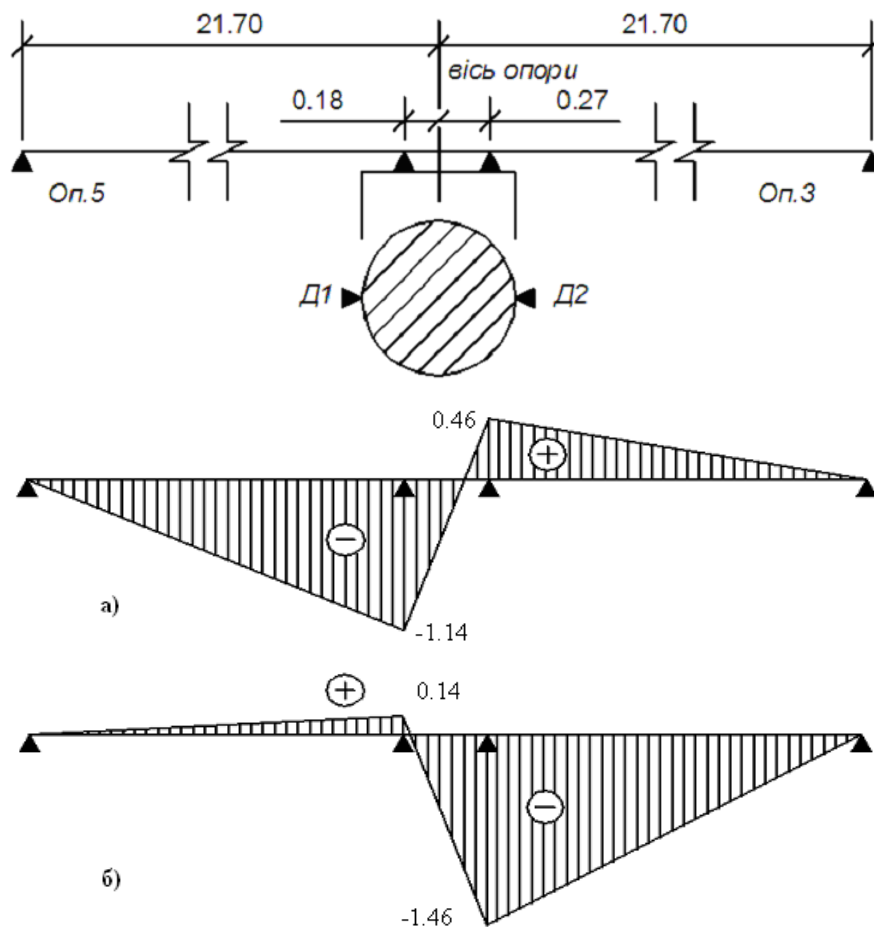


Рис. 3. Схема обпирання прогонових будов на опорі та лінії впливу для напружень в точках Д1 (а) та Д2 (б)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

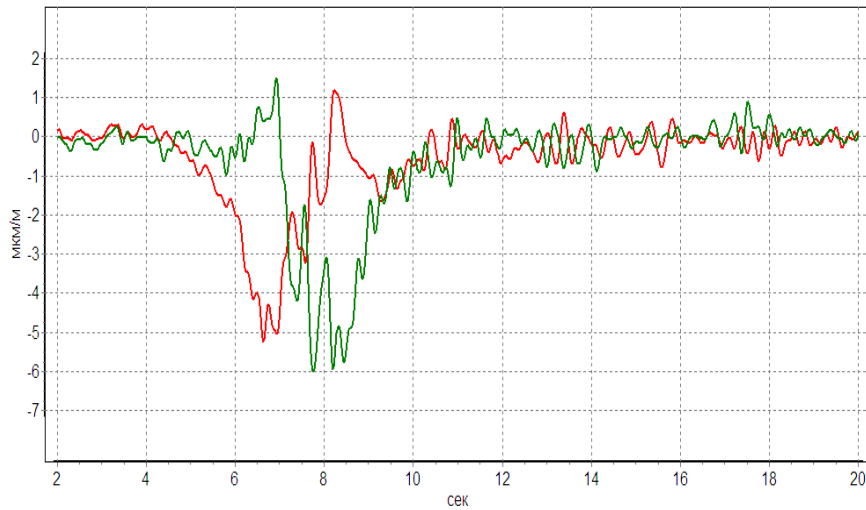


Рис. 4. Графіки показів датчиків при проїзді вантажівки над опорою

Проріз в бетоні глибиною біля 10 мм виконувалася поблизу датчика Д2 (приблизно 20 мм від середини датчика). За геометричними характеристиками прорізу (див. рис. 1) коефіцієнт приведення має бути близьким до 2. На рис. 5 показано діаграму зміни показів (мкм/м)

датчика Д2 під час виконання прорізу. Реєстрація показів виконувалася неперервно, тому добре видно ділянку, де виконується проріз та ділянку охолодження (стабілізація показів).

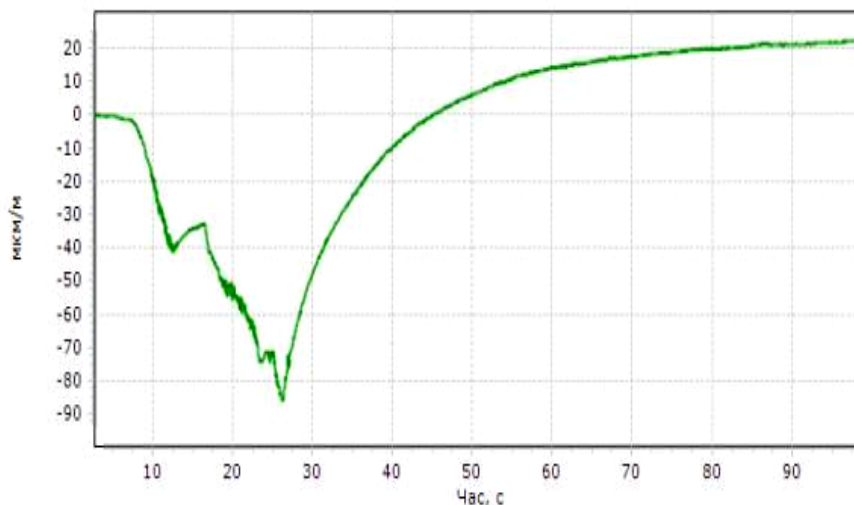


Рис. 5. Діаграма зміни відносних деформацій (мкм/м) в бетоні стійки мостової опори (одностороння прорізь)

За результатами вимірювань отримано зміну відносних деформацій 22×10^{-6} , що для модуля пружності бетону 32×10^3 МПа відповідає зміні напружень $\Delta F = 0,704$ МПа ($7,04$ кг/см²).

Графіки показів робочого та реперного датчиків під час проїзду над опорою випадкової вантажівки вже після виконання прорізу представлені 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 (визначення ваги прогонових будов та опори через натурні обміри конструкцій та питому вагу їх матеріалів) напруження в стійці опори для точки Д2 становлять близько 1,7 МПа.

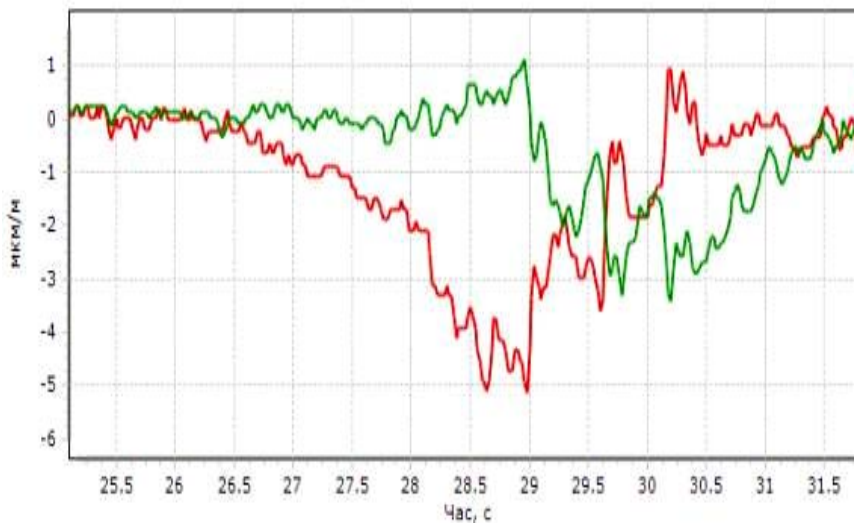


Рис. 6. Графіки показів датчиків при проїзді вантажівки над опорою після виконання прорізу біля одного з датчиків

Висновок

Як показали виконані дослідження, визначення напружень в залізобетонних мостових конструкціях можна виконувати шляхом вимірювання змін місцевих деформацій поблизу невеликого прорізу чи між двома прорізами. Пропонується ступінь виключення ділянки бетону біля прорізу із загальної роботи масиву бетону уточнювати за результатами випробування тимчасовим навантаженням. Натурний експеримент підтвердив працездатність методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування [Текст]. – Чинний від 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]. – Чинний від 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]. – Чинний від 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]. – Чинний від 2009-11-11. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 49 с.
6. Редченко, В. П. Температурные трещины в колоннах мостовых опор [Текст] / В. П. Редченко // Будівництво: 36. наук. пр. ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна. – Д., 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 – pp. 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 – pp. 134-143.

В. П. РЕДЧЕНКО^{1*}

^{1*} Днепропетровский комплексный отдел, Государственное предприятие «Государственный дорожный научно-исследовательский институт имени Н. П. Шульгина», ул. Батумская, 11, Днепропетровск, Украина, 49074, тел. +38 (050) 413 89 09, эл. почта rvp50@meta.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Цель. Актуальным для мостов, которые эксплуатируются, является вопрос определения напряженного состояния конструкций от постоянно действующих нагрузок. Для решения этого вопроса предлагается определять указанные напряжения методом несущественного локального разрушения, который необходимо усовершенствовать. **Методика.** Теоретические производились путем моделирования методом конечных элементов различных вариантов локального разрушения напряженного бетона. Результаты теоретических исследований были проверены проведением натурного эксперимента. **Результаты.** На основании анализа теоретических исследований были сформулированы основные принципы практической реализации метода определения постоянно действующих напряжений для железобетонных конструкций мостов путем выполнения неглубоких прорезей в напряженном бетоне. Для проверки результатов теоретических исследований был выполнен натурный эксперимент. **Научная новизна.** Определены зависимости изменения напряженного состояния по поверхности бетонного массива при производстве неглубокой щелевой прорези. Предложено усовершенствованный алгоритм определения начальных напряжений в бетоне за их изменением на поверхности бетона при производстве щелевой прорези. **Практическая значимость.** Внедрение в практику разработанного метода позволит более точно определять техническое состояние железобетонных мостов. По результатам натурного эксперимента было уточнено техническое состояние опоры моста и разработаны рекомендации по ее ремонту, о чем организации, которая занимается содержанием данного моста, был направлен технический отчет.

Ключевые слова: железобетонные конструкции; постоянные нагрузки; напряжения

V. P. REDCHENKO^{1*}

^{1*} Dnepropetrovsk complex department, The State Enterprise, «State Road Research Institute named after M. P. Shulgin», 2 Batumska Str., Dnipropetrovs'k, Ukraine, 49074, tel. +38 (050) 413 89 09, e-mail rvp50@meta.ua

EXPERIMENTAL DEFINITION OF RESIDUAL STRESSES IN CONCRETE CONSTRUCTIONS

Purpose. Relevant for bridges, which are operated, is a matter of determining the stress state of the structures standing loads. To solve this problem is proposed to determine the stress specified by the nonessential local destruction, which need to be improved. **Methodology.** Theoretical research produced by finite element modeling of different variants of local destruction of prestressed concrete. The theoretical results have been verified in-situ experiment. **Findings.** Based on an analysis of theoretical studies have formulated the basic principles of practical implementation method for the determination of permanent stresses for concrete structures of bridges by performing shallow slits in prestressed concrete. To check the results of theoretical research was carried out full-scale experiment. **Originality.** The dependence of changes in the stress state in the concrete surface of the slit parameters. Proposed improved algorithm for determining the initial stresses in the concrete for their variation on the surface of the concrete work at slot. **Practical value.** Implementation in practice of the developed method will more accurately determine the technical state of reinforced concrete bridges. According to the results of field experiment, it was clarified the technical condition of the bridge abutments and developed recommendations for its repair, and organization that deals with the content of this bridge was sent to the technical report.

Keywords: concrete constructions; constant a load; residual stresses

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. С. Распоповим (Україна).

Надійшла до редколегії 29.10.2013.

Прийнята до друку 30.11.2013.