

УДК 624.21

Стоянович С. В., канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>Полюга Р. І., канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0003-3729-0577>

Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури (НАОМА), м. Київ, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ
МОНОЛІТНОЇ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТУ****Анотація**

Вступ. В Україні все більше набувають популярності залізобетонні монолітні прогонові будови із застосування пост напружених систем. За результатами останніх досліджень, наявного досвіду застосування пост напруження при будівництві мостів можна виділити основні переваги таких рішень в порівнянні зі збірними попередньо напруженими конструкціями, а саме збільшення довжини прогонів та зменшення витрат матеріалів на їх влаштування.

Проблематика. Для досягнення більшої ефективності конструкцій прогонових будов із застосуванням пост напруження, які б прослужили запроектований строк, використовуючи всі свої переваги, важливо отримати комплексну інформацію про конструкцію, її технічний стан. Останні дослідження таких прогонових будов, що проводилися в Україні не дають змогу отримати більш якісну оцінку про роботу цих конструкцій цілому без детального дослідження їхніх характеристик при динамічних навантаженнях.

Тому питання вивчення динамічного впливу на монолітні залізобетонні прогонові будови влаштовані із застосуванням пост напружених систем є актуальним і потребує додаткових досліджень із метою вдосконалення та раціоналізації таких конструктивних рішень.

Мета. Дослідження динамічних характеристик (власних частот, декременту коливань та динамічного коефіцієнта) конструкції монолітної нерозрізної попередньо напруженої прогонової будови моста з натягом на бетон (пост напруженої системи).

Матеріали і методи. Під час написання статті використані матеріали випробувань залізобетонної прогонової будови моста через р. Десна на автомобільній дорозі загального користування державного значення М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (на м. Гомель), південний під'їзд до м. Чернігова на км 11 + 414.

Використані наступні методи досліджень: аналізування інформації, математичне моделювання, методи натурних і теоретичних досліджень.

Результати. На основі проведеного дослідження прогонової будови моста встановлено чотири форми коливань і частоти під дією динамічного навантаження. Найменш стабільні коливання відбуваються за першою формою. Коливання за цією формою збуджуються при швидкому русі транспорту та швидко згасають. Найбільш стабільні коливання прогонової будови (декремент коливань за даною формою не перевищує 0,04) має четверта форма коливань з частотою 5,91 Гц – ця форма коливань майже не чутлива до умов рухливості на кінцях прогонової будови і тому згасання коливань відбувається дуже повільно.

Представлено результати визначення динамічного коефіцієнта при різних швидкісних режимах руху одиночних автомобілів. При швидкості автомобілів від 10 км/год до 50 км/год значення коефіцієнта збільшується та становить від 1,07 – 1,23.

Висновки. За результатами аналізу отриманих даних виконання динамічних випробувань залізобетонної монолітної попередньо напруженої (пост напруженої системи) нерозрізної прогонової будови моста встановлено частоти основних форм власних коливань, значення динамічних коефіцієнтів для найбільш напружених конструктивних елементів прогонової будови.

Встановлено, що значення динамічних коефіцієнтів зі зростанням швидкості руху збільшуються та не перевищують нормативні значення.

Ключові слова: власні форми коливань, динамічний коефіцієнт, динамічні випробування, пост-напружені системи, прогонова будова.

Вступ

У мостобудуванні залізобетонні прогонові будови впродовж всього часу їхнього застосування постійно вдосконалюються. Враховуючи зростання маси транспортних засобів та інтенсивності їх руху, а також дефекти, що виникають у процесі експлуатації мостів, виникає необхідність під час проєктування нових і ремонтування існуючих прогонових будов у застосуванні покращених матеріалів і нових конструктивних рішень.

В Україні все більше набувають популярності залізобетонні монолітні прогонові будови з застосування пост напружених систем. За результатами останніх досліджень [1-5], наявного досвіду застосування пост напруження при будівництві мостів можна виділити основні переваги таких рішень в порівнянні зі збірними попередньо напруженими конструкціями, а саме збільшення довжини прогонів та зменшення витрат матеріалів на їх влаштування.

Для досягнення більшої ефективності конструкцій, які б прослужили запроєктований строк, використовуючи всі свої переваги, важливо отримати комплексну інформацію про конструкцію, її технічний стан. Ці дані можна отримати під час обстеження конструкцій та їх випробовування статичним і динамічним навантаженнями.

Аналізуючи останні дослідження, що проводилися в Україні [1 – 5], залізобетонних монолітних прогонових будов мостів з застосуванням пост напружених систем більшість випробувань виконувалось статичним навантаженням, що не дає змогу отримати більш якісну оцінку про роботу таких конструкцій в цілому без детального дослідження їхніх характеристик при динамічних навантаженнях.

В статті [6] авторами наведені результати досліджень монолітної залізобетонної прогонової будови влаштованої з застосуванням пост напруженої системи, на дію динамічних навантажень. Авторами описана методологія та результати виконання випробування прогонової будови з використанням імпульсного навантаження, що згідно з ДСТУ 8748 [7] відноситься до модального контролювання і є одним із видів динамічного випробування мостів. У результаті натурних і розрахункових досліджень отримали форми, частоти власних коливань прогонової будови, а також оцінено вплив наявних дефектів на жорсткість прогонової будови естакади та визначено її технічний стан.

Тому, враховуючи вище наведене, питання вивчення динамічного впливу на монолітні залізобетонні прогонові будови влаштовані із застосуванням пост напружених систем є актуальним і потребує додаткових досліджень з метою вдосконалення та раціоналізації таких конструктивних рішень.

Метою роботи є дослідження динамічних характеристик (власних частот, декременту коливань та динамічного коефіцієнту) конструкції монолітної нерозрізної попередньо напруженої прогонової будови моста з натягом на бетон (пост напруженої системи).

Основна частина

Об'єктом досліджень була нерозрізна залізобетонна монолітна попередньо напружена прогонова будова в осях 1 – 5 моста через р. Десна на автомобільній дорозі загального користування державного значення М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (на м. Гомель), південний під'їзд до м. Чернігова на км 11+414.

У статті [5] наведений опис конструкції прогонової будови, а також проведено оцінювання та прогнозування її технічного стану, наведені результати досліджень параметрів просторової роботи та напружено-деформованого стану на основі натурних статичних випробувань.

У поперечному напрямку прогонова будова влаштована з двох балок суцільного перерізу, крок балок — 5,65 м, балки об'єднані між собою плитою проїзної частини, армування балок виконане попередньо напруженими пучками з натягом на бетон (технологія «пост-напруження»). По довжині балки прогонової будови мають змінну висоту. За статичною схемою прогонова будова виконана нерозрізною, влаштована з чотирьох прогонів за схемою 33 м + 39 м + 39 м + 33 м. Розрахункові тимчасові навантаження на споруду — А-15, НК 100.

Загальний вигляд прогонової будови наведено на **рис. 1**.



Рисунок 1 — Загальний вигляд прогонової будови моста на стадії будівництва [5]

Під час випробування прогонової будови динамічним навантаженням реєструвалися вертикальні прискорення в рівні проїзної частини в середині прогону.

Збудження коливань прогонової будови відбувалося в результаті проїзду одиночного завантаженого автомобіля по осі проїзної частини з різними швидкостями (**рис. 2**). Також було виконано реєстрацію динамічних реакцій від дії транспортного потоку при загальному режимі руху транспорту по мосту. Загальні та місцеві деформації (прогини та напруження) реєструвалися електричними перетворювачами деформацій, підсилювалися, перетворювалися в цифровий формат та записувалися в пам'ять комп'ютера (**рис. 3**). Прискорення реєструвалися сеймоприймачем Piezoelectric Accelerometer Seismic DeltaTron® Accelerometer Type 8340 (**рис. 3**) та також записувалися в ПК за допомогою системи НВМ Quantum X з подальшою обробкою ПО Catman AP.

На випробування проїзд випробувального навантаження відбувався в одному напрямку.



Рисунок 2 — Загальний вигляд проїзду транспортного засобу через перешкоду для посилення імпульсу

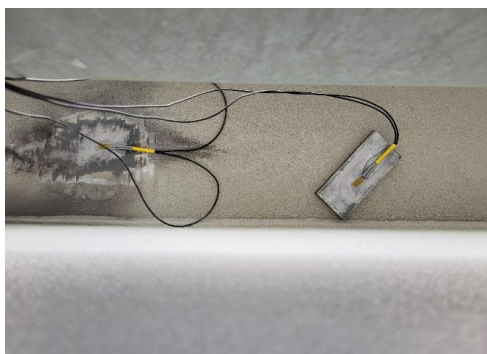
Враховуючи складний характер результуючих коливань прогонової будови, складові частоти результуючої діаграми динамічної реакції визначали шляхом гармонічного аналізу з визначенням амплітудного спектру частот, а також шляхом модального аналізу просторової розрахункової схеми в системі SCAD. Частоти власних коливань визначали за результатами аналізу ділянок діаграм вільних коливань конструкції (після з'їзду навантаження).



а)



б)



в)



г)

а) електронний сейсмоприймач; б) датчик переміщень; в, г) тензодатчики.

Рисунок 3 — Загальний вигляд вимірювальних приладів

Найбільш характерні діаграми (ділянки вільних коливань) та їх амплітудні спектри частот представлені на **рис. 4**. Результати визначення частот власних коливань представлено в **табл. 1**, а їхні форми на **рис. 5**.

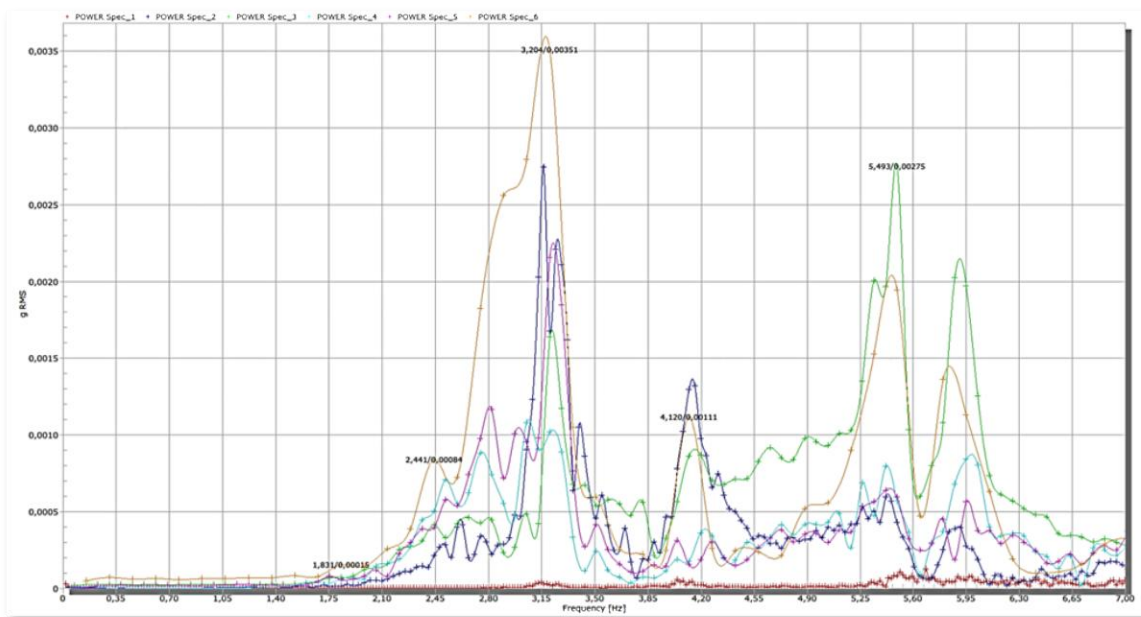
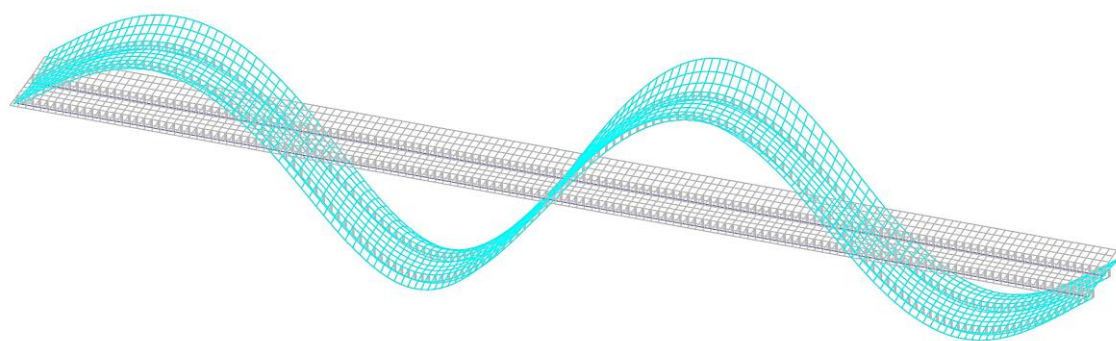
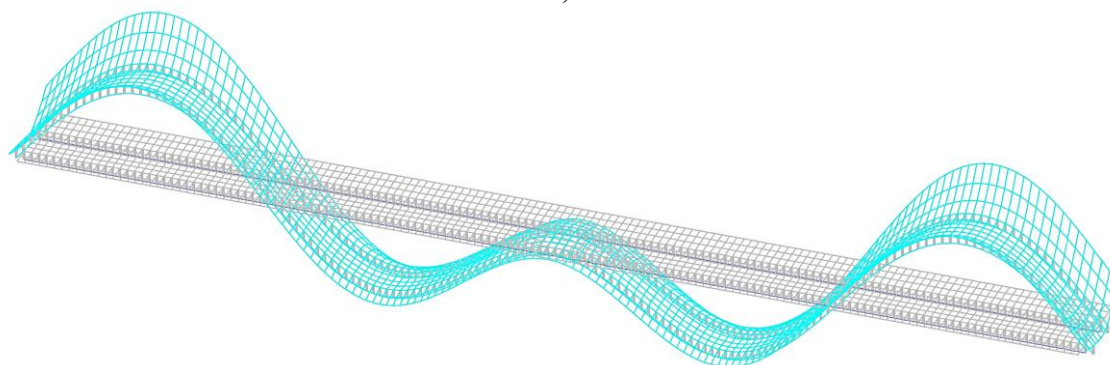


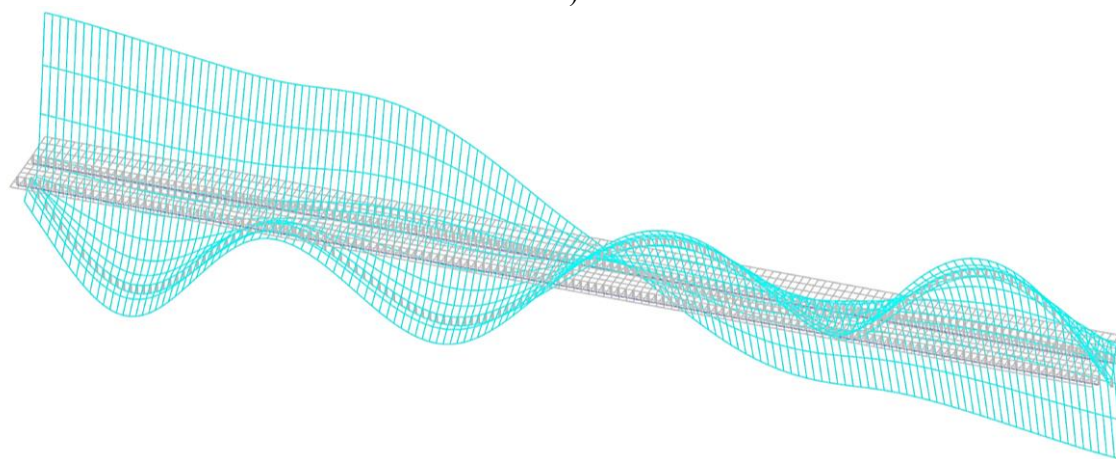
Рисунок 4 — Спектрограма амплітуд частот коливань конструкції при проїзді транспортного засобу



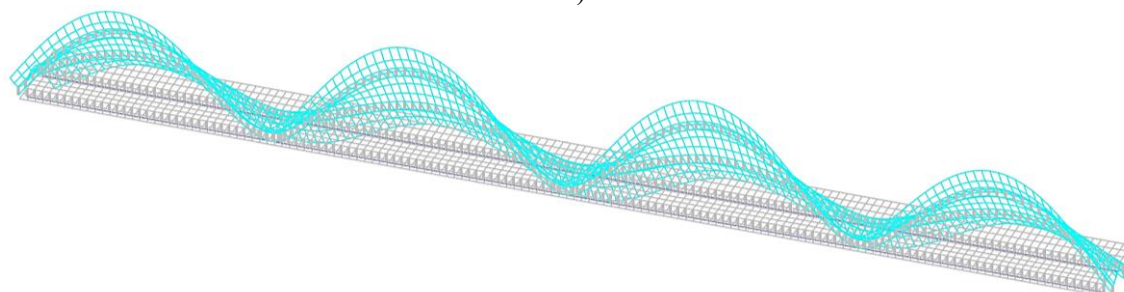
а)



б)



в)



г)

- а) перша форма; в) третя форма;
б) друга форма; г) четверта форма.

Рисунок 5 — Форми власних коливань

Таблиця 1

Частоти коливань та їх декременти

Форма коливань	Частота, Гц	Відхилення, %	Декремент
Перша	3,14	2,59	0,16
Друга	4,13	2,53	0,08
Третя	5,44	1,11	0,07
Четверта	5,91	1,35	0,04

Найменш стабільні коливання відбуваються за першою формою. Коливання за цією формою збуджуються при швидкому русі транспорту та швидко згасають. Під час руху навантаження коливання прогонової будови відбуваються і за формами з більш високими частотами, які визначаються крайніми прольотами та різними формами закручування поперечника — ці форми ще під час перебування навантаження на конструкції переходять одна в одну та зникають після з'їзду транспорту з прогонової будови.

Найбільші стабільні коливання прогонової будови (декремент коливань за даною формою не перевищує 0,04) має четверта форма коливань з частотою 5,91 Гц — ця форма коливань майже не чутлива до умов рухливості на кінцях прогонової будови і тому згасання коливань відбувається дуже повільно. Близькість значень частот за всіма визначеними формами видно і з **табл. 1**.

У **табл. 2** представлено результати визначення динамічного коефіцієнта при різних швидкісних режимах руху одиночних автомобілів.

Таблиця 2

Значення динамічних коефіцієнтів при різних швидкісних режимах

Швидкість, км/год	Динамічний коефіцієнт
10	1,07
15	1,09
20	1,09
25	1,10
30	1,10
35	1,10
40	1,15
45	1,22
50	1,23

Вцілому, відповідно до **табл. 1**, динамічні коефіцієнти мають досить не великі значення, збільшуються із зростанням швидкості руху та не перевищують нормативні значення.

Висновки

За результатами аналізу отриманих даних виконаних динамічних випробувань залізобетонної монолітної попередньо напруженої (пост напруженої системи) нерозрізної прогонової будови моста встановлено частоти основних форм власних коливань і значення динамічних коефіцієнтів для найбільш напружених конструктивних елементів прогонової будови.

Встановлено, що значення динамічних коефіцієнтів зі зростанням швидкості руху збільшуються та не перевищують нормативні значення.

Список літератури

1. Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. Дослідження тріщиностійкості монолітної попередньо напруженої естакади методом акустичної емісії. *Дороги і мости*. Київ, 2010. № 12. С. 56–62.
2. Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. Робота залізобетонного монолітного попередньо напруженого нерозрізного моста під навантаженням. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2011. № 22. С. 658–665.
3. Ковальчик Я. І., Сташук П. М., Фаль А. Є., Бабяк І. П. Аналіз термонапруженого стану монолітної попередньо напруженої естакади. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2015. С. 123–134.
4. Стоянович С. В., Полюга Р. І. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної монолітної попередньо напруженої прогонової будови шляхопроводу. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 221–233. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.221>.
5. Стоянович С. В., Полюга Р. І. Дослідження залізобетонної прогонової будови мосту із застосуванням системи пост-напруження. *Вісник Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури*. 2024. Вип. 2. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2024-2-5>.
6. Редченко В. П., Завгородній С. С. Динамічні випробування мостів імпульсним навантаженням. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.185>.
7. ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).

References

1. Koval P. M., Stashuk P. M., Kovalchik Ya. I. Doslidzhennia trishchynostiikosti monolitnoi poperedno napruzhenoi estakady metodom akustychnoi emisii [Study of crack resistance of monolithic prestressed overpass by acoustic emission method]. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2010. Issue 12. P. 56–62 [in Ukrainian].
2. Koval, P. M., Stashuk, P. M., & Kovalchik, Ya. I. (2011). Robota zalizobetonnoho monolitnoho poperedno napruzhenoho nerozriznoho mosta pid navantazhenniam [Operation of a reinforced concrete monolithic prestressed continuous bridge under load]. *Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats* [Resource-saving materials, constructions, buildings and structures], (22), 658–665 [in Ukrainian].
3. Kovalchik Ya. I., Stashuk P. M., Fal A. Ye., Babiak I. P. Analiz termonapruzhenoho stanu monolitnoi poperedno napruzhenoi estakady [Analysis of the thermal stress state of a monolithic prestressed overpass]. *Visnyk NU «Lvivska politekhnikha»*. *Teoriia i praktyka budivnytstva*. Lviv, 2015. P. 123–134 [in Ukrainian].
4. Stoianovych, S.V., & Poliuha, R.I. (2023). Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu zalizobetonnoi monolitnoi poperedno napruzhenoi prohonovoi budovy shliakhoprovodu [Study of the stressed and deformed state of the reinforced concrete monolithic prestressed span structure of the overpass]. *Dorohy i mosty: zbirnyk naukovykh prats* [Roads and bridges: collection of scientific papers], (28), 221–233. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.221> [in Ukrainian].
5. Stoianovych, S., & Poliuga, R. (2024). Research of a reinforced concrete pre-stressed bridge structure using a post-tension system. *Bulletin of the National Academy of Fine Arts and Architecture*, No. 2 (2024), 27–33. DOI: <https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2024-2-5> [in Ukrainian].
6. Vasyl Redchenko, Serhii Zavhorodnii. Dynamic testing of bridges with impulse loading. *Dorohy i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2023. Issue 28. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.185> [in Ukrainian].
7. DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8748:2017) Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Sergii Stoianovych, *Ph.D., Assoc. Prof.*, <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>

Roman Poliuga, *Ph.D., Assoc. Prof.*, <https://orcid.org/0000-0003-3729-0577>

National Academy Of Fine Arts And Architecture (NAFAA), Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A REINFORCED CONCRETE MONOLITHIC PRE-STRESSED BRIDGE SPAN STRUCTURE

Abstract

Introduction. In Ukraine, reinforced concrete monolithic span structures using post-tensioned systems are becoming more and more popular. According to the results of recent studies and existing experience in the use of post-tensioning in bridge construction, the main advantages of such solutions compared to prefabricated pre-stressed structures can be identified, namely, an increase in the length of spans and a decrease in the cost of materials for their installation.

Problems Statement. To achieve greater efficiency of post-tensioned span structures that would last the designed term, using all their advantages, it is important to obtain comprehensive information about the structure, its technical condition. Recent studies of such span structures conducted in Ukraine do not allow for a more qualitative assessment of the operation of these structures as a whole without a detailed study of their characteristics under dynamic loads.

Therefore, the issue of studying the dynamic impact on monolithic reinforced concrete span structures arranged with the use of post-tensioned systems is relevant and requires additional research in order to improve and rationalize such structural solutions.

Purpose. Research of dynamic characteristics (natural frequencies, oscillation decrement and dynamic coefficient) of a monolithic continuous prestressed span bridge structure with tension on concrete (post-tensioned system).

Materials and Methods. When writing the article, the materials of the tests of the reinforced concrete span structure of the bridge across the Desna River on the public highway of state importance M-01 Kyiv – Chernihiv – Novi Yarylovychi (to the city of Gomel), the southern entrance to the city of Chernihiv at km 11+414 were used.

The following research methods were used: information analysis, mathematical modeling, methods of full-scale and theoretical research.

Results. Based on the conducted study of the bridge span structure, four vibration forms and frequencies under the action of dynamic loading were established. The least stable vibrations occur according to the first form. Vibrations according to this form are excited by the fast movement of transport and quickly fade away. The largest stable vibrations of the span structure (the decrement of vibrations according to this form does not exceed 0.04) have the fourth vibration form with a frequency of 5.91 Hz - this vibration form is almost insensitive to the conditions of mobility at the ends of the span structure and therefore the damping of vibrations occurs very slowly.

The results of determining the dynamic coefficient at different speed modes of movement of single cars are presented. At car speeds from 10 km/h to 50 km/h, the value of the coefficient increases and ranges from 1.07 to 1.23.

Conclusion. According to the results of the analysis of the obtained data from the dynamic tests of the reinforced concrete monolithic prestressed (post-stressed system) continuous span structure of the bridge, the frequencies of the main forms of natural vibrations and the values of dynamic coefficients for the most stressed structural elements of the span structure were established. It was established that the values of dynamic coefficients increase with increasing speed and do not exceed the standard values.

Keywords: span, post-tensioned systems, dynamic tests, dynamic coefficient, natural forms of oscillations.