

УДК 669.01: 621.9

СТАН МОСТІВ УКРАЇНИ, ПРОБЛЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ НАТУРНИХ ВИПРОБОВУВАНЬ

ІГНАТИШИН М. І.

Мукачівський державний університет

В статті розглянуто стан мостів України. Є потреба побудови нових та реконструкції старих мостів. Необхідно проводити натурні випробовування перед введенням в експлуатацію нового та реконструкції старого мосту. Відомо, що жорсткість мостової споруди зменшується з появою та збільшенням сумарної площі тріщин, це в свою чергу, зменшує її ресурс. Важливо провести паспортизацію мостів з метою оцінки їх залишкового ресурсу та визначення послідовності капітальних ремонтів і реконструкцій. Суттєвим недоліком існуючих методів випробовувань мостових споруд є неможливість безпосереднього визначення важливих фізичних та механічних характеристик конструктивного елемента моста, зокрема ефективної жорсткості, ефективної товщини залізобетонної плити прогонової будови мосту, ефективного модуля пружності матеріалу та ін., що можуть змінюватися в процесі експлуатації. Від цих показників залежить залишковий ресурс мосту.

В статті побудовано механіко-математичну модель статичного навантаження мостової плити. При побудові моделі застосовано диференціальне рівняння Софі Жермен, що описує деформацію тонкої пластини (плити). Це диференціальне рівняння автором модифіковано і представлено у відносних координатах. Відносні координати точок плити міняються від 0 до 1 і отримані шляхом ділення відповідних координат поверхні плити, x та y , на її розміри, a та b . Таке представлення робить можливим здійснювати комп'ютерне моделювання статичного навантаження мостової споруди та порівнювати дві різні конструкції, або реальний міст та його зменшену лабораторну модель, наклавши зображення деформації (силових факторів) одне на одне.

Отримано співвідношення, що пов'язують результати статичних та динамічних випробувань з інтегральною циліндричною жорсткістю мостової плити, ефективним значенням модуля пружності, ефективною товщиною та густиною матеріалу плити. Отримані співвідношення застосовано на практиці для обробки результатів натурального експерименту. Проведено розрахунки ефективних механічних характеристик проїзної частини мосту.

Ключові слова: *циліндрична жорсткість, діагностика моста, прогин залізобетонної плити, ефективна товщина плити, натурні випробовування мосту*

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Багаторазова зміна норм проектування та несвоєчасна реконструкція призвели до того, що на сьогодні транспортні мости України суттєво різняться за вантажопідйомністю. Серед капітальних мостових споруд існують такі, що розраховані на рух колон автомобілів за схемами Н-8, Н-10, Н-13, Н-18, Н-30 та А-11. Спецнавантаження для мостів приймали за схемами НГ-60 і НК-80: 46,4 % споруд, що мають обмежений габарит, розраховані на навантаження за схемами Н-10 (Н-13) і НГ-60, тобто не задовольняють умови руху сучасних транспортних засобів.

Дослідженнями стану мостів, проектуванням, реконструкцією, діагностикою та оцінкою ресурсу займаються Н. Г. Бондарь, Б. Г. Гнідець, В. Г. Кваша, П. М. Коваль, В. П. Кожушко, Й.Й. Лучко, Б. Є. Патон, О. С. Распопов, В. П. Силованюк та інші. В Україні ж мостобудування нерозривно пов'язане з іменем Є. О. Патона

Значна кількість мостів побудована за технічними нормами, що діяли до 1962 року. На сьогодні вони не відповідають умовам руху автотранспорту як за вантажопідйомністю, так і за габаритами проїзної частини. Наприклад, навіть мостові споруди з габаритом 9 м у більшості випадків відхилені від діючих норм і, відповідно, потребують розширення. А це, у свою чергу, вимагає проведення досліджень, лабораторних і натурних випробовувань до і після реконструкції.

Необхідне проведення паспортизації мостів за результатами випробовувань з метою визначення послідовності проведення їх реконструкції з огляду на обмеженість виділених для цього коштів.

Орієнтовну схему класифікації методів випробувань на фізичній основі розглянуто в праці [1] і показано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Схема класифікації неруйнівних методів

| | | |
|------------------------------|---|---|
| Неруйнівний метод досліджень | Механічні методи визначення поверхневої твердості | Метод відскоку |
| | | Метод відбитків |
| | | Метод забивання та виривання стержня |
| | Звукові та ультразвукові | Резонансний метод |
| | | Метод акустичної емісії |
| | | Методи ультразвукові |
| | | Ударний метод |
| | Оптичні | Голографічна інтерферометрія |
| | | Метод голографії |
| | Радіаційні | Нейтронні методи |
| | | Методи з використанням гальмівного випромінювання та гамма-променів |
| | Електромагнітні | Метод поглинання НВЧ-хвиль |
| | | Метод електромагнітної індукції |

Суттєвим недоліком неруйнівного методу є неможливість безпосереднього визначення важливих фізичних та механічних характеристик конструктивного елемента моста, зокрема ефективної жорсткості, товщини залізобетонної плити прогонової будови мосту, ефективного модуля пружності матеріалу та ін., що можуть змінюватися в процесі експлуатації.

Стосовно натурних динамічних та статичних випробувань слід відмітити важливість інформації, яку можна отримати з результатів натурних випробувань, оскільки А. С. Моргун встановлено зв'язок жорсткості з наявністю тріщин [2, 3], що, в свою чергу, пов'язано з ресурсом мостової споруди.

Отже, актуальним є побудова і застосування механіко-математичних моделей теорії пружності, отримання необхідних співвідношень, що пов'язують результати статичних і динамічних випробувань із важливими фізичними й механічними властивостями мосту, та їх розрахунок.

Об'єкт, предмет та методи дослідження

Об'єктом дослідження є прогонова будова моста в процесі натурних випробувань. Предметом дослідження є механіко-математична модель натурних випробувань. Дослідження проводилось методами, що застосовуються в механіці деформівного твердого тіла.

При розрахунках використано результати статичного випробування моста через р. Стара Ріка на автодорозі Мукачево – Рахів – Івано-Франківськ – Рогатин (км 92+700 у Закарпатській області).

Постановка задачі

На основі огляду наукових літературних джерел можна побачити, що на даний час переважають чисельні методи. Аналітичні розв'язки, що містять повну інформацію про досліджувану модель мостової конструкції, через свою громіздкість майже не розглядаються, тому далі ми ставимо задачу отримати аналітичний розв'язок прогину мостової плити під дією навантажень при натурних випробуваннях.

Результати та їх оцінка

Побудуємо механіко-математичну модель натурних випробувань. Навантаження будемо вважати розподіленим рівномірно на прогоновій будові мосту.

Отримаємо співвідношення, що пов'язують результати статичних та динамічних випробувань з інтегральною циліндричною жорсткістю мостової плити, ефективним

значенням модуля пружності, ефективною товщиною та густиною матеріалу плити. Отримані співвідношення застосуємо на практиці для обробки результатів натурального експерименту.

Диференціальне рівняння Софі Жермен [4], що описує деформацію тонкої пластини (плити), можна записати так:

$$D\nabla^2\nabla^2w = q. \quad (1)$$

де D – циліндрична жорсткість плити, ∇^2 – оператор Лапласа, w – поперечна деформація плити, q – питоме навантаження.

Диференціальне рівняння (1) за певних крайових умов можна застосувати для моделювання деформації проїзної частини моста.

Об'єктом дослідження є статично навантажений міст.

Представимо статично навантажений міст як ізотропну залізобетонну плиту ефективною товщиною h . Запишемо диференціальне рівняння (1) у змінних (η, ξ) –

$$\eta = \frac{x}{a}, \quad \xi = \frac{y}{b}, \quad (2)$$

де a – довжина плити, b – ширина плити, що дозволяють компактно представити результати.

Диференціальне рівняння деформації плити:

$$\frac{1}{a^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} + 2 \frac{1}{a^2 b^2} \frac{\partial^4 w}{\partial^2 \eta \partial^2 \xi} + \frac{1}{b^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} = \frac{1}{D} q(\eta, \xi). \quad (3)$$

Розв'язок знайдемо, розділивши змінні η та ξ :

$$w(\eta, \xi) = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(\xi) \sin(i\pi\eta), \quad (4)$$

де

$$Y_i(\xi) = A_i \operatorname{sh}(\alpha\xi) + B_i \operatorname{ch}(\alpha\xi) + C_i \xi \operatorname{sh}(\alpha\xi) + D_i \xi \operatorname{ch}(\alpha\xi) + \varphi_i(\xi) \quad (5)$$

та

$$\alpha = \frac{b}{a} i\pi. \quad (6)$$

При $q = \text{const}$ частковий розв'язок неоднорідного рівняння щодо змінної ξ , що утворюється з (3) при розділенні змінних:

$$\varphi_i(\xi) = \frac{2q}{D} \frac{a^4}{(i\pi)^5} (1 - \cos(i\pi)) = \frac{2q}{D} \frac{a^4}{(i\pi)^5} (1 - (-1)^i) = \text{const}. \quad (7)$$

Крайові умови для плити, вільно опертої на краях $\eta=0;1$ та вільної на інших:

$$w(0, \xi) = w(1, \xi) = 0; \quad M_1(0, \xi) = M_1(1, \xi) = 0; \quad (8)$$

$$M_2(\eta, 0) = M_2(\eta, 1) = 0; \quad V_2(\eta, 0) = V_2(\eta, 1) = 0, \quad (9)$$

де

$$M_1 = -D \left(\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + \nu \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right); \quad (10)$$

$$M_2 = -D \left(\frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \nu \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} \right); \quad V_2 = -D \left(\frac{1}{b^3} \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3} + (2-\nu) \frac{1}{a^2 b} \frac{\partial^3 w}{\partial \eta^2 \partial \xi} \right). \quad (11)$$

Розв'язок (6) побудований так, що задовольняє крайові умови (6).

Із крайових умов (8, 9) впливає система чотирьох рівнянь для знаходження констант A_i, B_i, C_i, D_i .

У матричному варіанті система рівнянь має вигляд:

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \\ V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Елементи матриці:

$$\begin{aligned} M_{11} = M_{14} = M_{32} = M_{33} = 0; \quad M_{12} &= \frac{\alpha^2}{b} \nu \frac{i\pi^2}{a}; \quad M_{13} = 2\frac{\alpha}{b^2}; \\ M_{21} = M_{12}sh(\alpha); \quad M_{22} &= M_{12}ch(\alpha); \quad M_{23} = M_{12}sh(\alpha) + M_{13}ch(\alpha); \\ M_{24} = M_{13}sh(\alpha) + M_{12}ch(\alpha); \quad M_{31} &= \frac{\alpha^3}{b} (2 - \nu) \frac{\alpha}{b} \frac{i\pi^2}{a}; \\ M_{34} = 3\frac{\alpha^2}{b^3} (2 - \nu) \frac{1}{b} \frac{i\pi^2}{a}; \quad M_{41} &= M_{31}ch(\alpha), \quad M_{42} = M_{31}sh(\alpha); \\ M_{43} = M_{34}sh(\alpha) + M_{31}ch(\alpha); \quad M_{44} &= M_{31}sh(\alpha) + M_{34}ch(\alpha). \end{aligned} \quad (13)$$

Елементи правої частини системи:

$$V = 2 \frac{\nu}{(i\pi)^3} \frac{a^2 q}{D} [1 - (-1)^i]. \quad (14)$$

Розв'язок системи (12):

$$A_i = -\frac{1+\nu}{i\pi} a^3 b \frac{V \left[\frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh\left(i\pi \frac{b}{a}\right) + 1 \right] \left(ch\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - 1 \right)}{\left\{ [(3+\nu)a]^2 + [(1-\nu)i\pi b]^2 \right\} sh^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - \left\{ [(1-\nu)i\pi b] ch\left(i\pi \frac{b}{a}\right) \right\}^2}; \quad (15.1)$$

$$B_i = -\frac{1+\nu}{i\pi} a^3 b \frac{V \frac{2}{1+\nu} \left\{ sh\left(i\pi \frac{b}{a}\right) + \frac{(\nu-1)i\pi b}{2a} \left[\frac{(3+4\nu+\nu^2)a^2 + [(1-\nu)i\pi b]^2}{[(1-\nu)i\pi b]^2} sh^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - ch^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) \right] \right\}}{\left\{ [(3+\nu)a]^2 + [(1-\nu)i\pi b]^2 \right\} sh^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - \left\{ [(1-\nu)i\pi b] ch\left(i\pi \frac{b}{a}\right) \right\}^2} \quad (15.2)$$

$$C_i = -\frac{1+\nu}{i\pi} a^3 b \frac{V \frac{b}{a} \frac{i\pi(\nu-1)}{1+\nu} \operatorname{sh}\left(i\pi \frac{b}{a}\right) \left[1 - \frac{3+\nu}{i\pi(\nu-1)} \frac{a}{b} \operatorname{sh}\left(i\pi \frac{b}{a}\right)\right]}{\left\{[(3+\nu)a]^2 + [(1-\nu)i\pi b]^2\right\} \operatorname{sh}^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - \left\{[(1-\nu)i\pi b] \operatorname{ch}\left(i\pi \frac{b}{a}\right)\right\}^2}; \quad (15.3)$$

$$D_i = -\frac{1+\nu}{i\pi} a^3 b \frac{V \frac{b}{a} \frac{i\pi(1-\nu)}{1+\nu} \left[\frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} \operatorname{sh}\left(i\pi \frac{b}{a}\right) + 1\right] \left(\operatorname{ch}\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - 1\right)}{\left\{[(3+\nu)a]^2 + [(1-\nu)i\pi b]^2\right\} \operatorname{sh}^2\left(i\pi \frac{b}{a}\right) - \left\{[(1-\nu)i\pi b] \operatorname{ch}\left(i\pi \frac{b}{a}\right)\right\}^2} \quad (15.4)$$

Використовуючи співвідношення (16), запишемо формулу для визначення жорсткості плити, що пов'язана з експериментально визначеною деформацією плити, наприклад, у точці η_p, ξ_p (17).

Дані статичних випробувань можна застосувати як вихідні і пов'язати їх через математичну модель із механічною характеристикою конструкції, котру назвемо інтегральною циліндричною жорсткістю моста.

Для прикладу ми застосували результати статичних випробувань моста через р. Стара ріка, що розташований на автомобільній дорозі Мукачево-Рогатин, після реконструкції [5]. Загальна довжина моста $a = 24,3$ м, ширина $b = 8,3$ м. Як випробувальне навантаження використовували завантажений баластом автомобіль КраЗ вагою 22 т та стріловий колісний кран КС вагою 24 т (максимальна загальна вага навантаження 46 тонн). Максимальний прогин моста становив 0,41 мм. За формулою (17) було розраховано інтегральну циліндричну жорсткість прогонової будови моста – вона становить $D = 3,048 \cdot 10^{10}$ Нм. Оскільки у процесі експлуатації конструкції в мостових плитах утворюються тріщини й циліндрична жорсткість зменшується, важливо знати відносну зміну циліндричної жорсткості, а не абсолютну.

Розв'язком рівняння (3) буде співвідношення (16).

Числове значення інтегральної циліндричної жорсткості мостової плити, отримане за формулою (17), є наближеним, оскільки ми вважали, що навантаження розподілене рівномірно. Такий розподіл має місце, наприклад, при деформації плити під дією власної ваги. Розподіл силових факторів, що зображені на графіках і виникають у процесі статичних випробувань, також є наближеним. У наступних дослідженнях ми зробимо послідовні кроки з уточнення моделі розподілу навантаження, отримаємо більш точні формули для розрахунку циліндричної жорсткості мостової плити і порівняємо моделі. Це дозволить зробити висновок стосовно того, які параметри, що характеризують напружено-деформований стан, сильно, а які слабкіше залежать від того, наскільки точно математична модель наближена до модельованого об'єкта, мостової залізобетонної плити.

$$\begin{aligned}
 w(\eta, \xi) &= \frac{2(1+\nu)\nu}{\pi^4} \frac{qa^5}{Db} \times \\
 &\times \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^i}{i^4 \left\{ \left[\left((3+\nu)\frac{a}{b} \right)^2 + [(1-\nu)i\pi]^2 \right\} \left[sh^2\left(i\pi\frac{b}{a}\right) - [(1-\nu)i\pi]^2 ch^2\left(i\pi\frac{b}{a}\right) \right] \right\}} \times \\
 &\left[\begin{aligned}
 &\left[\frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh\left(i\pi\frac{b}{a}\right) + 1 \right] \left[ch\left(i\pi\frac{b}{a}\right) - 1 \right] sh(\alpha\xi) + \\
 &\frac{2}{1+\nu} \times \left\{ sh\left(i\pi\frac{b}{a}\right) - \frac{i\pi(1-\nu)a}{2b} \left[\frac{\nu^2 + 4\nu + 3^2}{\left[(1-\nu)i\pi\frac{b}{a} \right]^2} + 1 \right] sh^2\left(i\pi\frac{b}{a}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - ch^2\left(i\pi\frac{b}{a}\right) \right\} \times \\
 &\quad \times ch(\alpha\xi) - \\
 &\quad - \frac{b}{a} \frac{i\pi(1-\nu)}{1+\nu} sh\left(i\pi\frac{b}{a}\right) \left[1 + \frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh\left(i\pi\frac{b}{a}\right) \right] \xi \cdot sh(\alpha\xi) + \\
 &\quad + \frac{b}{a} \frac{i\pi(1-\nu)}{1+\nu} \left[1 + \frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh\left(i\pi\frac{b}{a}\right) \right] \left[ch\left(i\pi\frac{b}{a}\right) - 1 \right] \xi \cdot ch(\alpha\xi) + \\
 &\quad + \frac{a}{b} \frac{(\nu+3)^2}{i\pi(1+\nu)\nu} \left(1 - ch^2\left(i\pi\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} i\pi \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)\nu} \right) \\
 &\quad \times \sin(i\pi\eta).
 \end{aligned} \right] \times
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{2(1+\nu)\nu}{\pi^4} \frac{qa^5}{w(\eta_p, \xi_p) b} \times \\
 &\times \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^i}{i^4 \left\{ \left[\left((3+\nu) \frac{a}{b} \right)^2 + [(1-\nu)i\pi]^2 \right\} sh^2 \left(i\pi \frac{b}{a} \right) - [(1-\nu)i\pi]^2 ch^2 \left(i\pi \frac{b}{a} \right)} \right\}} \times \\
 &\times \left[\begin{aligned} &\left[\frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh \left(i\pi \frac{b}{a} \right) + 1 \right] \left[ch \left(i\pi \frac{b}{a} \right) - 1 \right] sh(\alpha\xi) + \\ &\frac{2}{1+\nu} \times \left\{ sh \left(i\pi \frac{b}{a} \right) - \frac{i\pi(1-\nu)a}{2b} \left[\frac{\nu^2 + 4\nu + 3^2}{[(1-\nu)i\pi \frac{b}{a}]^2} + 1 \right] sh^2 \left(i\pi \frac{b}{a} \right) - \right. \\ &\quad \left. - ch^2 \left(i\pi \frac{b}{a} \right) \right\} \times \\ &\times ch(\alpha\xi) - \\ &\frac{b}{a} \frac{i\pi(1-\nu)}{1+\nu} sh \left(i\pi \frac{b}{a} \right) \left[1 + \frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh \left(i\pi \frac{b}{a} \right) \right] \xi \cdot sh(\alpha\xi) + \\ &+ \frac{b}{a} \frac{i\pi(1-\nu)}{1+\nu} \left[1 + \frac{3+\nu}{i\pi(1-\nu)} \frac{a}{b} sh \left(i\pi \frac{b}{a} \right) \right] \left[ch \left(i\pi \frac{b}{a} \right) - 1 \right] \xi \cdot ch(\alpha\xi) + \\ &+ \frac{a}{b} \frac{(\nu+3)^2}{i\pi(1+\nu)\nu} \left(1 - ch^2 \left(i\pi \frac{b}{a} \right) + \frac{b}{a} i\pi \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)\nu} \right) \end{aligned} \right] \times \\
 &\times \sin(i\pi\eta).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Застосовуючи співвідношення, що пов'язує модуль пружності $E = 2 \times 10^{11} \text{Н/м}^2$ (згідно з національними нормами Західної Європи, вважається, що прогінна будова моста сталевий [6]), циліндричну жорсткість D , коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,4$ та товщину плити h :

$$h = \sqrt[3]{12(1-\nu^2) \frac{D}{E}}, \tag{18}$$

ми розрахували ефективну товщину мостової плити. Вона становить $h = 1,154 \text{ м}$. Ефективна товщина плити не є її геометричним параметром, а умовною величиною, що пов'язана з циліндричною жорсткістю. Ми стверджуємо, що зменшення відносної ефективної товщини вказує на появу тріщин у мостовій плиті. Тому важливо проводити розрахунки ефективної товщини мостової плити за результатами статичних випробувань. Ефективну товщину важливо знати ще й тому, що від неї залежить величина напруження, що виникає в перерізі навантаженої плити.

Визначення власної частоти коливань мостової плити.

Власні частоти коливань плити f :

$$f = \frac{\alpha^2}{4\pi} h \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}. \quad (19)$$

Вихідні дані для розрахунку частоти f : α – знаходиться з розв’язку нелінійного рівняння (20), ρ – приймається рівною густині залізобетону, ν – приймається такою, що дорівнює коефіцієнту Пуассона для залізобетону, E – модуль пружності $E = 2 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$ згідно з [7], h – ефективна товщина мостової плити.

$$F(\alpha) = th \left(\sqrt{(\alpha b)^2 + \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2} \right) \sin \left(\sqrt{(\alpha b)^2 - \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2} \right) + \left[\frac{2A_{11}A_{13}A_{22}A_{24}}{(A_{13}A_{22})^2 - (A_{11}A_{24})^2} \right] \left[\frac{1}{ch \left[\sqrt{(\alpha b)^2 + \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2} \right]} - \cos \left[\sqrt{(\alpha b)^2 - \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2} \right] \right] = c \quad (20)$$

де

$$A_{11} = \left(\frac{\alpha_1}{b}\right)^2 - \nu \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2; \quad A_{12} = A_{14} = 0; \quad A_{13} = \left(\frac{\alpha_2}{b}\right)^2 - \nu \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2; \quad A_{21} = A_{23} = A_{22} = \left(\frac{\alpha_1}{b}\right)^3 - (2-\nu) \frac{\alpha_1}{b} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2; \quad A_{24} = -\left(\frac{\alpha_2}{b}\right)^3 - (2-\nu) \frac{\alpha_2}{b} \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2. \quad (21)$$

$$\alpha_1^2 = (\alpha b)^2 + \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2 \quad \text{та} \quad \alpha_2^2 = (\alpha b)^2 - \left(\frac{b}{a} n\pi\right)^2 \quad (22)$$

Приклад 1. Вихідні дані: $\alpha = 0,374676030203 \text{ м}^{-1}$, $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,4$, $E = 2 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $h = 1,154 \text{ м}$. Результат: $f = 72,636 \text{ Гц}$.

Визначення модуля пружності мостової плити.

Модуль пружності мостової плити:

$$E = 48\pi^2 (1-\nu^2) \frac{\rho}{\alpha^4} \left(\frac{f}{h}\right)^2 \quad (23)$$

Вихідні дані для розрахунку модуля пружності мостової плити E : α – знаходиться з розв’язку нелінійного рівняння (23), f – визначається експериментально з динамічних випробувань, ν – приймається такою, що дорівнює коефіцієнту Пуассона для залізобетону, h – ефективна товщина мостової плити.

Приклад 2. Вихідні дані: $\alpha = 0,374676030203 \text{ м}^{-1}$, $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,4$, $f = 1,8 \text{ Гц}$, $h = 1,154 \text{ м}$. Результат: $E = 1,228 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$

Визначення ефективної густини мостової плити.

Ефективна густина мостової плити:

$$\rho = \frac{E}{48\pi^2 (1-\nu^2)} \alpha^4 \left(\frac{h}{f}\right)^2 \quad (24)$$

Вихідні дані для розрахунку густини мостової плити ρ : α – знаходиться з розв’язку нелінійного рівняння (20), f – визначається експериментально з динамічних

випробувань, ν – приймається такою, що дорівнює коефіцієнту Пуассона для залізобетону, E – модуль пружності $E = 1,228 \times 10^8$ Н/м², h – ефективна товщина мостової плити.

Приклад 3. Вихідні дані: $\alpha = 0,374676030203$ м⁻¹, $f = 1,8$ Гц, $\nu = 0,4$, $E = 1,228 \times 10^8$ Н/м², $h = 1,154$ м. Результат: $\rho = 2500$ кг/м³.

Отже, провівши теоретичне дослідження математичної моделі залізобетонної мостової плити, ми отримали зображення деформації мостової плити за рівномірного розподілу навантаження у вигляді збіжного функціонального ряду гіперболічних і тригонометричних функцій. Таке представлення має перевагу над числовими методами розрахунку, тому що є найбільш адекватним, інформаційно містким. Завдяки цьому ми отримали теоретично обґрунтовані співвідношення, що пов'язують результати статичних випробувань із механічними параметрами плити.

Аналізуючи наведені вище приклади, приходимо до висновку, що за результатами динамічних випробувань слід прийняти модуль пружності залізобетонної мостової плити рівним $E = 1,228 \times 10^8$ Н/м² за динамічних навантажень.

Результати розрахунків зведено в таблицю 1

Таблиця 1.

Результати розрахунків за даними натурних випробувань.

| | | |
|-------------------------------------|--|---|
| Модель 1. Рівномірний розподіл сили | Максимальний питомий згинальний момент M_1 (Н) та напруження σ (Н/м ²) в площині $\eta = const$, (координати, м) | $1,705 \times 10^5$; $0,768 \times 10^6$; (12,15; 8,3) |
| | Питомий згинальний момент M_2 (Н) в площині $\xi = const$, (координати максимуму, м) | $1,074 \times 10^4$; (12,15; 4,15) |
| | Питомий крутний момент H , (координати максимуму, м) | $2,553 \times 10^4$; (24,3; 8,3) |
| | Питома поперечна сила Q_1 (Н/м) в площині $\eta = const$ (координати максимуму, м) | $2,148 \times 10^4$; (0,00; 4,15) |
| | Питома поперечна сила Q_2 (Н/м) в площині $\xi = const$ (координати максимуму, м) | $2,605 \times 10^3$; (12,15; 0,00) |
| | Циліндрична жорсткість, D (Н/м) | $3,048 \times 10^{10}$ |
| Ефективна товщина, h (м) | 1,154 | |

Висновки

Ефективна інтегральна циліндрична жорсткість та ефективна товщина плити прогонової будови моста через р. Стара Ріка відповідно:

циліндрична жорсткість – $D = 3,048 \cdot 10^{10}$,

товщина плити – $h = 1.154$ м.

Ефективна товщина плити не є її конструктивним параметром, а умовною величиною, що пов'язана з циліндричною жорсткістю.

Зменшення відносної ефективної товщини з часом може вказувати на появу тріщин у мостовій плиті.

Відносна зміна циліндричної ефективної жорсткості та товщини у часі, яку можна виявити за повторного статичного випробування, є корисною інформацією про залишковий ресурс експлуатації моста.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лучко Й. Й. Мости. Конструкції та надійність / Лучко Й. Й., Коваль П. М., Корнієв М. М. [та ін.] / за ред. В.В. Панасюка і Й.Й. Лучка. – Л.: Каменярь, 2005. – 989 с.
2. Моргун А. С. Дослідження зміни жорсткості через появу тріщин залізобетонних балок при статичних довготривалих навантаженнях / Моргун А. С., Моргун І. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця : Будівництво, 2007. – № 1. – с. 24-27.

3. Моргун А. С. О вычислении $\psi^*(t)$ с учетом возрастания нагрузки во времени / Моргун А. С. // Вопросы строительства и архитектуры. – Минск : Высшая школа, 1977. – Вып. 7. – с. 25-30.
4. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. – М. : Терра, 2001. – 726 с.
5. Випробування монолітного залізобетонного моста через р. Стара Ріка / Коваль П. М., Походенько А. Г., Лучко Й. Й., Фаль А. Є. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наук. праць. – Л. : Каменяр, 2003. – Вип. 5. – с. 65-72.
6. Батухина А. Г. Анализ временных нагрузок мостов стран Западной Европы / Батухина А. Г. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наук. праць. – Львів : Каменяр, 2002. – Вип. 5. – с. 443-454.
7. Ахвердов И. Н. Влияние усадки, условий твердения, циклических температурных воздействий на сцепление арматуры с бетоном / Ахвердов И. Н. // Бетон и железобетон. – 1968. – № 12. – с. 4-7.

АННОТАЦІЯ

СОСТОЯНИЕ МОСТОВ УКРАИНЫ, ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В статье рассмотрено состояние мостов Украины. Есть потребность построения новых и реконструкции старых мостов. Необходимо проводить натурные испытания перед вводом в эксплуатацию нового и реконструкцией старого моста. Известно, что жесткость мостового сооружения уменьшается с появлением и увеличением суммарной площади трещин, в свою очередь, это уменьшает его ресурс. Важно провести паспортизацию мостов с целью оценки их остаточного ресурса и определения последовательности капитальных ремонтов и реконструкций. Существенным недостатком существующих методов испытаний мостовых сооружений является невозможность непосредственного определения важных физических и механических характеристик конструктивного элемента моста, в частности эффективной жесткости, эффективной толщины железобетонной плиты пролетного строения моста, эффективного модуля упругости материала, которые могут меняться в процессе эксплуатации. От этих показателей зависит остаточный ресурс моста.

В статье построена механико-математическая модель статической нагрузки мостовой плиты. При построении модели применено дифференциальное уравнение Софи Жермен, описывающее деформацию тонкой пластины (плиты). Это дифференциальное уравнение автором модифицировано и представлено в относительных координатах. Относительные координаты точек плиты меняются от 0 до 1 и получены путем деления соответствующих координат поверхности плиты, x и y , на ее размеры, a и b . Такое представление делает возможным осуществлять компьютерное моделирование статической нагрузки мостового сооружения и сравнивать две разные конструкции или реальный мост и его уменьшенную лабораторную модель, наложив изображение деформации (силовых факторов) друг на друга.

Получены соотношения, связывающие результаты статических и динамических испытаний с интегральной цилиндрической жесткостью мостовой плиты, эффективным значением модуля упругости, эффективной толщиной и плотностью материала плиты. Полученные соотношения применены на практике для обработки результатов натурального эксперимента. Проведены расчеты эффективных механических характеристик проезжей части моста.

Ключевые слова: цилиндрическая жесткость, диагностика моста, прогиб железобетонной плиты, эффективная толщина плиты, натурные испытания моста.

SUMMARY

UKRAINE MOST STATE, PROBLEMS DIAGNOSIS AND TREATMENT OF RESULTS FIELD TESTS

In the article the state of bridges in Ukraine. There is a need construction of new and reconstruction of old bridges. It is necessary to conduct full-scale testing before commissioning new and reconstruction of the old bridge. It is known that the rigidity of bridges is reduced with the advent and increasing the total area of cracks, which in turn reduces its life. It is important to conduct certification bridges to assess their residual life and sequencing overhauls and reconstructions. A significant disadvantage of existing methods for testing of bridges is the inability to directly determine important physical and mechanical properties of the structural element of the bridge, including the effective stiffness, the effective thickness of the reinforced concrete slab span bridge, the effective modulus material etc. Which may change during operation. From these indicators depends residual life of the bridge.

The article is built mathematical models of mechanics and static loading bridge plate. In constructing the model applied Sophie Germain differential equation describing the deformation of a thin plate (plates). This