

УДК 624.21

Визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням

Редченко В.П., к.т.н.

Дніпропетровський відділ ДерждорНДІ, Україна

Анотація. В статті представлено методику визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробувань імпульсним навантаженням.

Аннотация. В статье представлена методика определения распределения усилий между балками пролетного строения по результатам его испытаний импульсной нагрузкой

Abstract. The technique of definition of distribution of efforts between beams span of bridges by results of its tests by pulse loading are submitted.

Ключевые слова: розподіл зусиль, випробування імпульсним навантаженням, балки.

Вступ. Визначення та моніторинг технічного стану будівельних конструкцій і мостів зокрема за інтегральними структурними параметрами, які визначаються динамічними випробуваннями, займає чинне місце серед інших методів діагностики та отримує все більше розповсюдження як у світовій, так і у вітчизняній практиці [3, 4, 6 – 8]. Знання натурних параметрів конструкцій та споруд є необхідною умовою при визначенні їх вантажопідйомності та технічного стану [5]. За діючими нормами оцінку характеру просторової роботи прогонової будови рекомендується виконувати за результатами її випробувань [1]. Можливості проведення та вибір методики випробувань залежать від багатьох умов, тому чим більший перелік методик випробувань є в арсеналі дослідника, тим інтенсивнішим буде весь процес планової діагностики дорожніх споруд. У цій статті представлено основи розробленої автором методики визначення характеру просторової роботи конструкції за результатами її випробувань імпульсним навантаженням.

Теоретичні основи методу. Більшість реальних конструкцій прогонових будов можна з достатньою достовірністю вважати лінійними системами з постійними параметрами, тобто такими, що описуються лінійними диференціальними рівняннями з постійними параметрами. Розглянемо лінійну стаціонарну систему як певного роду “чорний ящик”, у якого є вхід, до якого прикладаємо навантаження, та вихід, де реєструємо реакцію системи. Для реальної конструкції таких “входів” та “виходів” може бути безкінечна кількість. Для означеної нами системи справедливими є прин-

ципи суперпозиції та стаціонарності, що дозволяє легко знайти реакцію на певному виході на будь-яке навантаження на якомусь із входів, знаючи всього одну функцію – реакцію системи на цьому виході на подане на відповідний вхід навантаження у вигляді дельта-функції. Ця реакція називається імпульсною характеристикою системи $h(t)$. Дельта-функція $\delta(t)$ або ж функція Дірака представляє собою безкінечно короткий в часі імпульс із безкінечною амплітудою, “площа” імпульсу дорівнює одиниці. Спектр дельта-функції є одиничною константою в безкінечній смузі частот. Будь-яке навантаження $P_{ex}(t)$ можна представити у вигляді згортки цього ж навантаження з дельта-функцією [9]

$$P_{ex}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{ex}(t')\delta(t-t')dt. \quad (1)$$

Лінійна система перетворює відносно змінної t всі функції, які входять до цього виразу. Вхідне навантаження при цьому перетворюється у вихідну реакцію $R_{вих}(t)$, а дельта-функція – в імпульсну характеристику. Відповідно реакція системи на виході буде представляти собою згортку вхідного навантаження та імпульсної характеристики (2).

$$R_{вих}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{ex}(t')h(t-t')dt. \quad (2)$$

Вираз (2) в теорії динаміки споруд добре відомий як одна з форм представлення інтеграла Дюамеля [2].

Перетворення Фур'є від згортки функцій дає добуток спектрів цих функцій, тому в частотній області реакція лінійної системи описується дуже просто (3)

$$S_{вих}(\omega) = S_{ex}(\omega)K(\omega), \quad (3)$$

де $S_{ex}(\omega)$ та $S_{вих}(\omega)$ - відповідно спектральні функції навантаження на вході та реакції на виході системи; $K(\omega)$ – спектральна функція імпульсної характеристики системи, яку ще називають комплексним коефіцієнтом передачі системи, а її модуль та фазу – відповідно амплітудно-частотною (АЧХ) та фазово-частотною (ФЧХ) характеристиками системи.

АЧХ системи показує у скільки разів амплітуда реакції на виході системи відрізняється від амплітуди синусоїдального навантаження в залежності від частоти ω . Значення АЧХ при $\omega=0$, тобто статичному навантаженні, є коефіцієнтом впливу, який широко застосовується при розрахунках конструкцій.

На практиці АЧХ натурних будівельних конструкцій визначають випробуванням з використанням вібраційної машини. Аналізуючи наведені вище теоретичні викладки, бачимо, що АЧХ лінійної системи можна отримати шляхом визначення спектральної функції реакції системи на ідеальний одиничний імпульс. На практиці саме відмінність реального імпульсу від ідеального та отримання спектральних функцій реакції на обмеженому в часі інтервалі і викликають певну відмінність у графіках амплітудних спектрів реакцій та дійсних АЧХ, які отримуємо використовуючи вібраційну машину. Врахування значення імпульсу як функції викликає труднощі практичного характеру, які полягають в недоліках методів реєстрації амплітуди прикладеного імпульсу, і ще потребують свого вирішення.

Якщо порівнювати амплітудні спектри реакцій на один і той же імпульс для декількох “виходів” та брати відносні значення їх амплітуд при $\omega=0$, то можна визначити відносний розподіл зусиль від дії прикладеного статичного навантаження в точці “входу” між елементами конструкції. Для прогонових будов мостів однією з таких відносних характеристик є коефіцієнт поперечного розподілу (КПР) навантаження між головними балками.

Перевірка методики на моделі. Перевіримо висловлене припущення на моделі прогонової будови в програмному середовищі, яке реалізує МСЕ. Модель однопрольотної прогонової будови приймаємо із стержньових елементів у вигляді балкового ростверку (рис. 1).

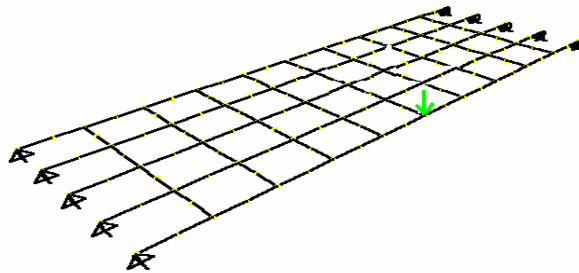
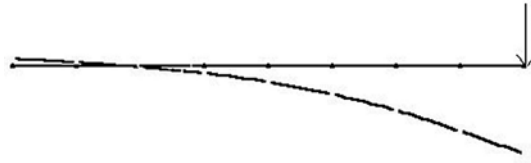


Рис. 1. Розрахункова модель прогонової будови у вигляді балкового ростверку

Навантажимо прогонову будову статичною силою, яка прикладена до крайньої головної балки в середині прольоту. На рис.2 представлено епюру статичних прогинів та наведені дані прогинів головних балок у середині прольоту в абсолютному значенні та у відносних величинах, які характеризують розподіл зусиль між балками.

Динамічне навантаження приймаємо у вигляді імпульсу загальною тривалістю 0,15 с, прикладеного до крайньої балки в середині прольоту.



мм	-0,0386	0,0046	0,0849	0,2373	0,4682
%	-5,1	0,6	11,2	31,4	61,9

Рис. 2. Лінія прогину поперечника прогонової будови при статичному навантаженні та значення прогинів головних балок в абсолютних та відносних величинах

Зміна амплітуди – за лінійною функцією (трикутний імпульс). Реєстровані реакції – прогини головних балок у середині прольоту. На рис. 3 представлені відповідні прогинограми та їх амплітудно-частотні спектри.

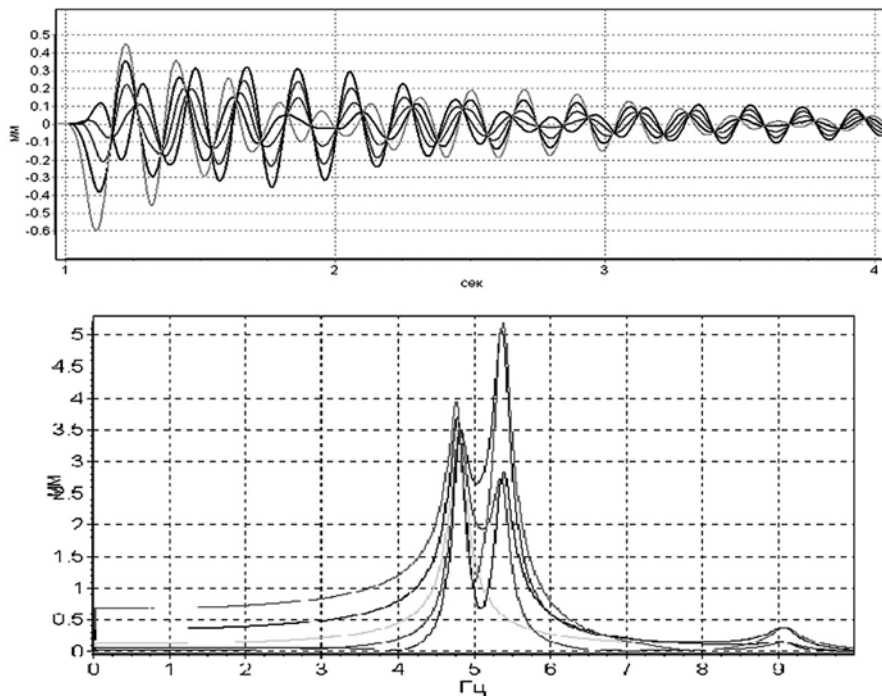


Рис. 3. Графіки прогинів головних балок при імпульсному навантаженні та їх амплітудно-частотні спектри

Значення амплітудного спектра залежать від довжини віброграми (часу), для якої виконуємо гармонічний аналіз. В ідеалі якщо аналізуємо безкінечно тривалу в часі віброграму, то амплітудно-частотний спектр повинен

бути повністю подібним АЧХ. Фізичним змістом амплітуд спектра на нульовій частоті є середнє значення амплітуди віброграми, яке також залежить від довжини віброграми. В даному випадку нас цікавлять лише їх відносні значення. В табл. 1 представлені абсолютні значення амплітуд спектра на нульовій частоті та їх відносний розподіл при аналізі віброграм тривалістю 9 секунд.

Таблиця 1

Одиниця виміру	Значення амплітуд спектра на нульовій частоті для різних балок				
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5
мм	-0,058	0,009	0,125	0,356	0,681
%	-5,4	0,8	11,2	31,9	61,2

Порівнюючи знайдений нами відносний розподіл амплітуд спектра з відносним розподілом зусиль при статичному навантаженні, можна бачити, що вони досить подібні. Так лише для однієї з балок різниця перевищує 3 %, що пояснюється дуже малим коефіцієнтом впливу для цієї балки – частка зусилля, яке вона сприймає, менша від 1 %.

Розглянемо тепер, як впливає на вказану розбіжність довжина віброграми, яку ми аналізуємо. Для цього повторимо всі розрахунки за різної довжини віброграм. У табл. 2 наведені результати визначення помилки (відносно статичного розподілу).

Таблиця 2

Довжина віброграми, сек	Різниця у визначенні КІР відносно статичного розподілу для різних балок при зміні довжини віброграми, %				
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5
1	-270,7	1484,7	18,1	-20,4	-29,6
2	43,4	-51,7	7,2	5,8	-0,2
3	41,3	-242,6	-8,7	4,9	4,8
4	-16,5	113,8	-1,0	0,3	-2,4
5	0,5	80,1	2,3	1,9	-2,1
6	-7,5	101,8	1,2	1,2	-2,4
7	3,7	36,1	0	2,1	-1,1
8	6,1	21,0	-0,4	2,3	-0,8
9	2,8	39,7	0	2,0	-1,2

Як бачимо, задовільними можна вважати результати аналізу віброграм тривалістю 5 і більше секунд (дані для Б2 не беремо до уваги через вище зазначені причини). Звичайно визначальним є не час (тривалість віброграми), а кількість циклів коливань та величина їх згасання – в даному випадку після 5-ї секунди амплітуди коливань зменшилися більш ніж у






10 разів від початкових. Аналітично можна вивести наступну умову до тривалості віброграми T у залежності від бажаної точності розрахунків

$$T \geq \frac{\ln(1/\varepsilon)}{\alpha} = \frac{\ln(1/\varepsilon)}{f \cdot \delta}, \quad (4)$$

де ε – задана точність, α – коефіцієнт демпфірування, f – частота коливань, δ – декремент коливань.

Аналогічним чином перевіримо вплив форми імпульсу на результати визначення КТР. Довжину віброграми, яку піддаємо аналізу, залишаємо постійною – 9 с. У табл. 3 наведені похибки у визначенні коефіцієнта впливу відносно статичного розподілу для різних балок при різних тривалості та формі імпульсного навантаження.

Таблиця 3

Тривалість імпульсу, сек	Форма імпульсу	Різниця у визначенні КТР відносно статичного розподілу для різних балок при різному імпульсному навантаженні, %				
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5
0,15		2,8	39,7	0	2,0	-1,2
0,3		3,4	37,7	0	2,0	-1,1
0,6		3,3	38,4	0	2,0	-1,1
0,35		3,0	41,6	0,1	2,0	-1,2
0,35		2,6	45,5	0,3	2,0	-1,3

Ігноруючи похибки для балки Б2, можна бачити, що результати визначення КТР мало залежать від тривалості та форми імпульсу, що є досить обнадійливим з практичної точки зору. В останньому рядку табл. 3 представлено імпульсне навантаження, яке моделює падіння маси на конструкцію – за типом удару копрові “баби”. Спочатку в момент звільнення маси з’являється імпульс оберненого знака, потім пауза на час падіння і вже після цього основний імпульс – удар маси по конструкції. За таким принципом працюють найбільш розповсюджені установки для прикладання імпульсного навантаження.

Висновки

Теоретичним дослідженням та перевіркою на моделі показано дієвість методики визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням. Перші експериментальні роботи, які розпочаті на натурних об'єктах, підтверджують теоретичні припущення, а виконання всього циклу запланованих експериментів дозволить відпрацювати практичні аспекти методики та довести її до широкого застосування.

Література

- [1] ВБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються. Київ: Укравтодор, 2002. – 76 с.
- [2] Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. / Пер. с англ. Москва, Стройиздат. 1979. – 320 с.
- [3] Коваль П.М., Филоненко С.Ф., Сташук П.М., Корниенко И.К. Анализ динамических характеристик моста. // Сб. Дороги и мосты. Вып. 9. – К.: 2008. – С. 119. – 128.
- [4] Кулябко В.В. Динамика конструкций, зданий и сооружений. Уч. для вузов. – Запорожье, 2005. – 232 с.
- [5] Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М., Лантух-лященко А.І. та ін. Мости: конструкції та надійність. – Львів: Каменярь, 2005. – 989 с.
- [6] Немчинов Ю.И., Кендзера А.В., Бугаевский Г.Н. Динамическая паспортизация сооружений как составная часть СНИПа. // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2004. – Вип. 60. – С. 193 – 198.
- [7] Carmelo Gentile, Alberto Gennari-Santori. Dynamic Testing and Modeling of a 30-years' old Cable-Stayed Bridge. / Structural Engineering International. 1/2006. – P. 39 – 43.
- [8] Masato Abe, Makoto Shimamura, Masaaki Matsunuma. Bridge Substructure Monitoring Using Live Load Induced Vibration. TRB 2007 Annual Meeting – 11 p.

Надійшла до редколегії 16.06.2009 р.