УДК 625.841

• © С.Й. Солодкий, докт. тех. наук, професор,
• © І.Ю. Думич, канд. тех. наук, доцент (НУ "Львівська політехніка")

ДЕЯКІ АСПЕКТИ КОНСТРУЮВАННЯ МОНОЛІТНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ЗА КРИТЕРІЄМ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Анотація. *Представлено дослідження залежності динамічної стійкості бетонних покриттів від наявності та товщини нежорсткого прошарку між плитами покриття і зміцненої цементом основи. Залежності встановлено експериментальним шляхом на моделях дорожніх одягів і в натурних умовах.*
Ключові слова: *автомобільна дорога, дорожній одяг жорсткого типу, монолітне бетонне покриття, основа, динамічна стійкість, нежорсткий прошарок.*

Аннотация. *Представлено исследование зависимостей динамической стойкости бетонных покрытий от наличия и толщины нежесткой прослойки между плитами покрытия и укрепленного цементом основания. Зависимости установлены экспериментальным путем на моделях дорожных одежд и в натурных условиях .*
Ключевые слова: *автомобильная дорога, дорожная одежда жесткого типа, монолитное бетонное покрытие, основание, динамическая стойкость, нежесткая прослойка.*

Annotation. *Research of dependences of dynamic stability of jointed unreinforced concrete pavement on the presence and thickness of flexible layer between the plates of pavement and reinforced cement coating base. Dependences are set experimental a way on the models of rigid pavement and in real condition.*
Keywords: *road, rigid pavement, jointed unreinforced concrete pavement, road foundation, dynamic stability, flexible layer.*

Вступ

Дія рухомого автомобіля на дорожнє покриття завжди має динамічний характер, оскільки зростання навантаження від нуля до максимального значення відбувається протягом дуже короткого часу, що вимірюється сотими долями секунди. Чим більша швидкість руху автомобіля, тим менший час прикладання навантаження, тим більший за інших рівних умов динамічний характер навантаження. Динамічна дія автомобіля на покриття має ударний характер за великих швидкостей, тому на жорстких цементобетонних покриттях, що мають незначне демпфування, динамічний ефект від рухомого навантаження проявляється більшою мірою, ніж на нежорстких асфальтобетонних.

Під час руху автомобіля по бетонному покриттю хвиля прогину рухається разом з автомобілем. Плита покриття коливається відносно зміщеного центру ваги, при цьому амплітуди коливань у 3 – 4 рази менші, ніж статичний прогин залежно від типу основи. Динамічну стійкість покриття, як числовий показник, характеризують відношенням суми статичного прогину й амплітуди коливань до статичного прогину. Чим менше це відношення, тим більша динамічна стійкість покриття.

Динамічні навантаження на цементобетонні покриття не тільки посилюють їх напружено-деформований стан, але й викликають небажані прискорення у приконтактному ґрунтовому шарі земляного полотна. За прискорених коливань покриття в межах від 0,05 *g* до 0,20 *g* відбувається доущільнення ґрунтів і зниження їх опору зсуву, особливо піщаних і супіщаних. Значення критичних прискорень, що не викликають зниження опору ґрунтів зсуву, дуже малі і вимірюються сотими долями *g*. Отже, динамічна дія автомобіля істотно впливає на вертикальну стійкість цементобетонних покриттів.

Одним із ефективних способів підвищення демпфуючих властивостей цементобетонних покриттів є влаштування основ із матеріалів, укріплених цементом. Такі основи істотно збільшують витривалість бетонних покриттів за певних співвідношень товщини плит основ і покриттів, а також зменшують амплітуди коливань плит залежно від наявності чи відсутності нежорсткого прошарку між плитами покриття та основи.

Чинними нормами рекомендується між покриттям і основою влаштовувати вирівнюючий шар з оброблених в'яжучим кам'яних матеріалів, зокрема чорного піску, який усуває нерівності основи і забезпечує можливість вільного переміщення плит цементобетонного покриття внаслідок зміни температури [1]. Водночас відсутні дослідження про вплив такого шару на динамічну стійкість бетонного покриття, що разом із чинниками витривалості, поздовжньої стійкості визначають довговічність дорожнього одягу загалом.

Метою проведених досліджень є з'ясування впливу вирівнюючого шару на динаміку сумісної роботи плит покриття і укріпленої цементом основи.

Основна частина

Методика випробування моделей бетонних покриттів на різних основах в масштабі 1:3 та конструкція стенду приведені в попередній публікації [2]. Циклічне динамічне навантаження створювали віброустановкою, яку використовували для випробувань на витривалість. Частота коливань віброустановки – 23 герц, амплітуда циклічного динамічного навантаження – 25 кН на два штампи. Дія віброустановки на моделі покриттів на різних основах має динамічний характер, що дало змогу, крім витривалості, досліджувати динамічну стійкість бетонних покриттів, у тому числі на укріплених цементом основах за різної товщини нежорсткого прошарку між плитами покриття та основи.

Під час випробувань на витривалість було виявлено значне зростання амплітуд коливань покриття при збільшенні жорсткого прошарку з 0,2 см до 0,8 – 1,0 см на відміну від статичних прогинів, які зросли неістотно для моделей покриттів товщиною 5,0 см на піскоцементних основах товщиною також 5,0 см. За подальшого зростання товщини нежорсткого прошарку амплітуди коливань покриття поступово зменшувались.

Для теоретичного аналізу цього експериментального процесу були використані диференціальні рівняння коливального руху двомасової системи – покриття та основи. З деякою мірою наближення така дорожня конструкція може бути представлена як двомасова пружно-в'язко-пластична модель. Замінивши сили в'язкого і пластичного опорів дисипативною силою введенням комплексної змінної í та коефіцієнтів непружного опору γ, отримуємо диференціальні рівняння коливального руху системи:

$$m_1\frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} + (1 + i\gamma_1)\cdot c_1 z_1 - (1 + i\gamma_2)\cdot c_2\cdot(z_2 - z_1) = 0,$$
$$m_2\frac{\partial^2 z_2}{\partial t^2} + (1 + i\gamma_2)\cdot c_2\cdot(z_2 - z_1) = P\sin\omega t, \qquad (1)$$

де m_1 і m_2 – маси;

z_1 і z_2 – вертикальні переміщення плит основи і покриття;

γ_1 і γ_2 – коефіцієнти непружного опору плити основи на ґрунтовому шарі і плити покриття на нежорсткому прошарку;

c_1, c_2 – жорсткості плит основи і покриття.

Наведені диференціальні рівняння мають комплексний вигляд. Введення уявної одиниці í означає, що сили непружного опору (дисипативні сили) зсунуті по фазі на кут 90° відносно пружних сил. Це положення теоретично встановлено й експериментально підтверджено в роботах Сорокіна Є.С. [3]. Використавши рівняння (1), розв'язок якого є в літературних джерелах, проаналізуємо коливальний рух в моделі бетонного покриття товщиною 5,0 см на цементоґрунтовій основі товщиною 5,0 см за різної товщини нежорсткого прошарку (чорний пісок) між ними (0,2 – 4,0 см) під дією динамічного навантаження, створюваного віброустановкою.

Параметри рівнянь (1) – маси, жорсткості та коефіцієнти непружного опору визначали експериментальним шляхом на моделях покриття в лабораторії.

Коефіцієнти непружного опору γ_1 і γ_2 визначали по осцилограмах вільних (власних) коливань основи і покриття від ударного навантаження за формулою:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}{\pi}, \qquad (2)$$

де – величини двох послідовних амплітуд власних коливань.

Жорсткості c_1 і c_2 плит основи і покриття визначали шляхом прикладання статичного навантаження (домкрат і динамометр) у центрі плит із фіксацією пружних прогинів з урахуванням послідовного з'єднання двох елементів (основи і покриття). Для можливості визначення прогинів і амплітуд коливань плити основи її влаштовували на 5 см ширшою від покриття. Маса m_1 включає масу плити основи, масу прошарку і масу приєднаного ґрунтового шару товщиною 0,25 – 0,30 м для моделі або 0,80 – 0,90 м для натурних умов. Маса m_2 визначається як сума мас покриття та віброустановки.

Таблиця 1

Вхідні параметри рівнянь (1), амплітуди і власні кругові частоти коливань плит основ і покриттів за різної товщини прошарку між ними

Товщина прошарку, см	c_1, Н/м	c_2, Н/м	m_1, кг	m_2, кг	γ_1	γ_2	a_1, мм	a_2, мм	ω_1 1/с	ω_2 1/с
0,2	$4{,}8\cdot10^7$	$10{,}1\cdot10^7$	1000	500	0,37	0,30	0,036	0,059	180	590
1,0	$4{,}8\cdot10^7$	$8{,}0\cdot10^7$	1100	500	0,37	0,27	0,028	0,078	192	381
2,0	$4{,}8\cdot10^7$	$7{,}5\cdot10^7$	1200	500	0,37	0,25	0,023	0,061	210	388
4,0	$4{,}8\cdot10^7$	$7{,}2\cdot10^7$	1300	500	0,37	0,23	0,022	0,046	209	440

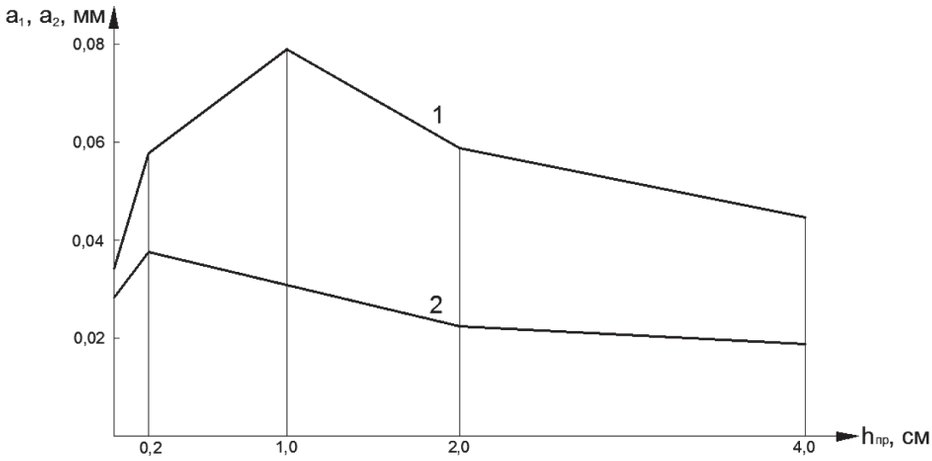

Рис. 1. **Залежність амплітуд коливань плит покриття і основи, і товщини прошарку між ними: 1 – покриття; 2 – основа**

Розв'язок рівнянь (1) відносно амплітуд коливань плит основ і покриттів, а також формули для підрахунку власних частот цих елементів мають дуже громіздкий вигляд і в даній статті не приводяться. Вхідні параметри і результати обчислень наведені у **табл. 1.** Для переходу від кругової частоти до циклічної необхідно зменшити її у 2π раз.

Залежність амплітуд коливань плит основ і покриттів (для центру плит) від товщини прошарку між ними наведені на **рис. 1.**

Аналіз даних графіка (**рис. 1**) свідчить, що найбільший напружено-деформований стан плити покриття під дією динамічного навантаження спостерігається за товщини нежорсткого прошарку в межах (0,8 – 1,2) см або (0,15 – 0,25) *H*, де *H* – товщина плити покриття. Це відповідає натурній товщині прошарку 3 – 4 см.

Різке збільшення динамічних прогинів покриттів за певної товщини нежорстких прошарків обумовлюється виникненням дробового внутрішнього резонансу. Такий резонанс згідно з дослідженнями М.В. Закржевського [4] є можливим, якщо хоча б один елемент коливальної системи має нелінійний зв'язок, тобто пружна відновлювальна сила не пропорційна переміщенням.

У системі "основа – покриття" перший елемент (основа) разом з приєднаним шаром ґрунту має практично нелінійний зв'язок із причини значних за величиною сил непружного опору. Ця обставина є причиною того, що амплітуди і власні частоти коливань основи значно нижчі ніж у покриття. Сутність дробового резонансу полягає в тому, що зростання амплітуд коливань одного з двох елементів системи можливе не тільки за співпадання частот власних коливань, але й тоді, коли їх відношення рівне цілому числу.

Найбільша імовірність виникнення внутрішнього дробового резонансу в системі "основа – покриття" існує, коли відношення частот власних коливань покриття ω_2 і основи ω_1 рівне 2 (**табл. 1**), що спостерігається за товщини прошарку 1 см. Внутрішній дробовий резонанс є основною, але не єдиною причиною зростання напружено-деформованого стану покриття при прошарках товщиною (0,15 – 0,25) *H* від дії динамічних навантажень. У таких конструкціях під дією динамічних навантажень, що спричиняють коливальний процес, спостерігається явище відриву плити покриття від основи. Аналіз осцилограм вільних коливань покриття від ударного навантаження в лабораторії і при різкому гальмуванні автомобіля КРАЗ 256Б в натурних умовах свідчить, що після першого півперіоду коливань плита покриття коливалась відносно нового дещо зміщеного вверх центру ваги.

Висновки

У натурних умовах резонансні явища мають явно виражений характер тільки під час руху по бетонних покриттях суцільних транспортних потоків. Щоб покращити динамічну стійкість бетонних покриттів на укріплених цементом основах необхідно відмовитись від влаштування будь-яких нежорстких прошарків між плитами покриття та основи. Такі конструкції за рахунок зчеплення між плитами покриття та основи працюють як об'єднана плита, мають підвищену несучу здатність, а для компенсації температурних напружень відстань між швами стискання достатньо зменшити приблизно на 10 – 15 %. Ці положення були перевірені на дослідній ділянці бетонного покриття товщиною 0,24 м на гравієцементній основі (ПГС + 7 % цементу) товщиною 0,2 м і довжиною 100 м за відстаней між швами стискання 6 м на автомобільній дорозі Київ – Чоп в районі с. Солонка Львівської області.

ЛІТЕРАТУРА

1. ВБН В.2.3-218-008-97 Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. – К., 1997.

2. Солодкий С.Й. Вплив типу основи на витривалість монолітних цементобетонних дорожніх покриттів / С.Й. Солодкий, І.Ю. Думич // Автошляховик України. – 2014. – № 2. – С. 23–26.

3. Сорокин Е.С. К вопросу неупругого сопротивления стройматериалов при колебаниях. – М.: Научное сообщение ЦНИПС, вып. 15, 1984. – 128 с.

4. Закржевский М.В. Колебания существенно-нелинейных упругих систем. – Рига: Зинатис, 1980. – 186 с.