

УДК 625.768.5

к.т.н., професор І.В. Кіяшко,
О.Ю. Пархоменко, Д.М. Новаковський,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЖОРСТКОГО ТИПУ

Розглянуто віброакустичні методи неруйнівного контролю якості цементобетонних шарів дорожнього одягу. Наведено недоліки та переваги методів з позиції потреб дорожньої галузі. Описано послідовність виконання робіт з контролю якості цементобетонних шарів за фазовим методом.

Ключові слова: *дорожній одяг жорсткого типу, неруйнівний контроль якості, фазовий метод, поверхнева хвиля типу Релея.*

Для забезпечення надійності функціонування конструкцій ведеться пошук нових технологій контролю якості при будівництві і оцінки стану в період експлуатації. Особливо велике значення це має для конструкцій, що працюють в умовах інтенсивного динамічного навантаження та під дією агресивного оточуючого середовища. Внутрішні дефекти, що не було виявлено на етапі будівництва, обумовлюють передчасну появу та інтенсивний розвиток руйнувань конструкції, зниження її працездатності та скорочення терміну служби. Отже, розробка та використання неруйнівного експрес-методу контролю якості та стану цементобетонних шарів дорожнього одягу є актуальною задачею.

Основними параметрами, що підлягають контролю, є міцність, щільність цементобетону, товщина конструкції [1]. Серед неруйнівних методів контролю якості цементобетонних конструкцій фізичної дії найбільш поширеними у застосуванні стали віброакустичні методи. До них належать такі методи як ударний імпульсний метод, резонансний метод, ультразвуковий метод та фазовий метод [2]. Дані методи отримали розповсюдження як на території колишнього Радянського Союзу, так і за кордоном.

Резонансний метод полягає у використанні незначних коливань всього зразка або невеликої конструкції в цілому [4]. При резонансному коливанні зразок деформується за трьома можливими напрямками: стискаючись або розширюючись по довжині (повздовжні коливання), вигинаючись змінно верх-вниз (згинальні коливання), скручуючись відносно повздовжньої осі, періодично проходячи через точку рівноваги (закручувальні коливання). При

резонансному методі використовують неперервні коливання високої частоти, тому метод має обмеження енергетичного порядку щодо розмірів та ваги конструкцій або зразків. Для визначення міцності бетону за допомогою методу необхідно попередньо скласти тарувальні залежності. Зогляду на недоліки, даний метод мало використовується при польових дослідженнях бетонних конструкцій на міцність, але знайшов широке застосування як метод руйнування старих бетонних споруд – злітно-посадочних смуг аеродромів, шарів жорстких дорожніх одягів автомобільних доріг [7](рис. 1)



1 — противаги масою від 5,5 до 9 т; 2 — головка, що передає навантаження на покриття через підшву розміром від 200 до 250 мм; 3 — резонансна стальна балка довжиною 3,8 м

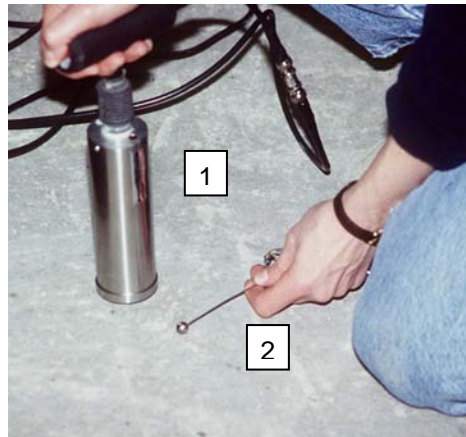
Рис. 1 – Резонансна машина RB-500 (а), вигляд зруйнованого покриття (б)

Ударний імпульсний метод полягає у реєстрації параметрів розповсюдження хвилі стиску, що утворюється у товщі матеріалу під дією ударного імпульсного навантаження (рис. 2).

Даний метод знайшов широке застосування в якості неруйнівного експрес-методу визначення товщини покриття [10]. Також даний метод використовується для оцінки якості структури бетону, наявності розшарувань та тріщин. Комплекс обладнання в класичній конфігурації складається з сейсмоприймача, генератору імпульсу ударної дії та обладнання для обробки і збереження даних.

Під дією імпульсу, прикладеного на поверхні матеріалу під час випробувань, виникають три види хвиль, що розповсюджуються крізь товщу матеріалу: хвиля стиску (P-wave), хвиля зсуву (S-wave) та поверхнева хвиля типу Релея (R-wave) [10].

Хвиля стиску розповсюджується напівсферичним фронтом в товщі матеріалу та , відбившись від його нижньої поверхні, повертається до верхньої.



1 – сейсмоприймач, 2 – ударний навантажувач (генератор імпульсу)

Рис. 2 – Обладнання для реєстрації параметрів розповсюдження хвиль стиску при оцінці міцності цементобетонних конструкцій

Відбиття від нижньої грані відбувається завдяки різниці щільності матеріалів плити та основи. Повним періодом коливання хвилі в даному разі вважається момент від її утворення чи відбиття від верхньої грані, проходження та відбиття від нижньої грані та повернення її до поверхні, проходячи подвійну товщину зразка (рис. 3, а).

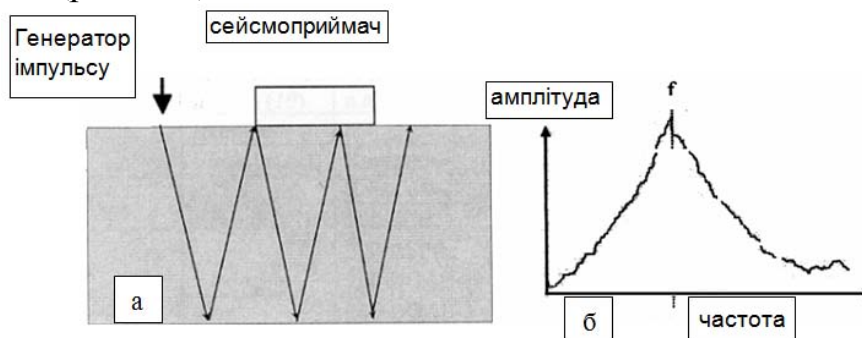


Рис. 3 – Розповсюдження хвилі стиску в товщі зразка (а) та приклад залежності частоти хвилі від її амплітуди (б)

Відома залежність, що пов'язує швидкість розповсюдження хвилі стиску (V_p), товщину зразка (h) та час проходження хвилею повного періоду коливання (t):

$$h = V_p \cdot (t / 2) \quad (1.1)$$

Більш прогресивним методом визначення товщини зразків є реєстрація та аналіз частотного спектру відображеного сигналу. Результатом такого аналізу є побудова графіку залежності частоти хвилі від амплітуди при проходженні її в товщі матеріалу (рис. 3, б), аналізуючи який можна визначити шукані характеристики матеріалу.

Існує схема використання пари сейсмоприймачів для реєстрації параметрів розповсюдження хвиль стиску [3,4]. При відомій відстані між датчиками, зареєстрував швидкість проходження хвилі, розраховують її швидкість розповсюдження. Використання такої схеми дозволяє оцінити властивості матеріалу між парою датчиків, а не в одній точці, особливості його структури та узагальнену товщину зразка. Але використання такої схеми пов'язане зі значними труднощами у обробці та інтерпретації сигналу.

До недоліків даного методу можна віднести наступне:

- метод має складності з інтерпретацією даних та потребує залучення кваліфікованих спеціалістів;
- потребує періодичного тарування приладу на лабораторних зразках;
- при наявності основи з матеріалу, подібного за фізико-механічними властивостями до матеріалу покриття, виникають труднощі з визначенням товщини шару, а в деяких випадках виконання даного випробування взагалі не можливе;
- потребує практичних навичок щодо сили прикладання імпульсного навантаження;
- має складну процедуру визначення показників міцності матеріалу.

Найбільш поширеним у застосуванні серед неруйнівних методів контролю якості цементобетонних виробів та конструкцій є ультразвуковий метод. Даний метод було розроблено в 50-х роках ХХ століття. Він має довгу історію, за яку пройшов чималу модернізацію, обумовлену розвитком матеріально-технічної бази. Даний метод засновано на аналізі параметрів розповсюдження високочастотних коливань достатньо малої амплітуди в обмеженому об'ємі матеріалу.

Для збудження ультразвукових хвиль на поверхні матеріалу встановлюються перетворювачі електричного току в механічні коливання [5,6] (рис. 4). Частіш за все використовуються перетворювачі, що працюють за принципом п'єзо ефекту. При цьому, для збудження коливань використовується, так званий, обернений п'єзо ефект, а в перетворювачах для прийому коливань – прямий.

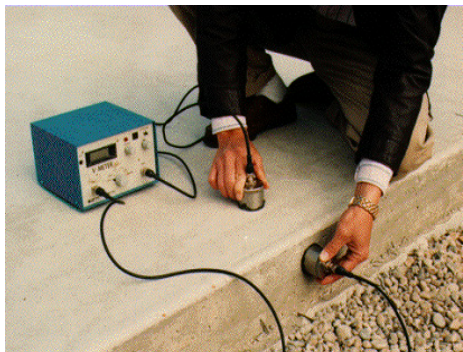


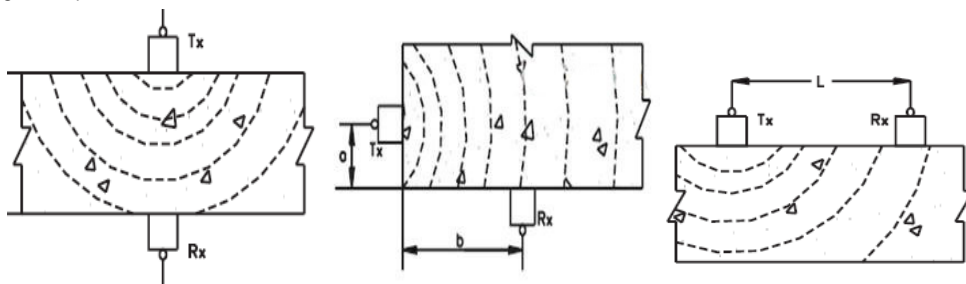
Рис. 4 – Обладнання для ультразвукового прозвучування

Оскільки повітряні прошарки перешкоджають передачі і прийому ультразвукових коливань, при обстеженнях використовують контактну речовину (наприклад солідол, технічний вазелін, епоксидну смолу та ін.).

Ультразвукові коливання потрапляють в конструкцію напрямленим пучком з малим кутом розсіювання. Можливість напрямленого прозвучування є суттєвою перевагою методу при виконанні оцінки стану конструкцій.

Ультразвукові хвилі, при проходженні з однієї середи в іншу, переломлюються та відбиваються від граней конструкції, що використовуються при визначенні геометричних параметрів конструкцій. Також, дані хвилі майже миттєво повністю згасають при потраплянні у повітряне середовище, що дозволяє виявляти наявність прихованих дефектів структури – тріщин, пор, полостей, раковин. Розрізняють поздовжні та поперечні хвилі [3,4]. В першому випадку частки коливаються в поздовжньому до лінії розповсюдження хвилі напрямку, в другому випадку – в поперечному. Однак, в обох випадках швидкість розповсюдження хвиль є однією з основних характеристик при оцінці фізико-механічних властивостей матеріалу. За напрямком прозвучування в практиці використовують три основних схеми: наскрізне, кутове та поверхневе прозвучування (рис. 5):

При наскрізному прозвучуванні збуджувач коливань та їх приймач розташовано один навпроти одного, причому напрямок ультразвукового променя може бути нормальним до поверхні конструкції, так і похилим. При поверхневому прозвучуванні зазначені елементи розташовано на одній площині конструкції. При такій схемі використовують один прийомно-передавальний перетворювач, що по чергово створює коливання та сам сприймає їх відображення.



1 – наскрізне прозвучування; 2 – кутове прозвучування; 3 – поверхневе прозвучування
Рис. 5 – Основні схеми прозвучування конструкцій ультразвуковим методом

За характером випромінювання розрізняють метод безперервного випромінювання, коли на джерело коливань безперервно подається струм постійної частоти, та імпульсний метод. Останній отримав найбільш широке застосування при дефектоскопії матеріалів. В даному методі до перетворювача через достатньо малі проміжки часу (наприклад, 25 або 50 раз за секунду) подаються пакети коливань високої частоти.

За результатами випробувань ультразвуковим методом визначають модуль пружності (E) при відомій щільності матеріалу (ρ) та вимірюваній швидкості проходження ультразвукових хвиль (v). Наприклад для елементів у формі стержня така залежність має вигляд:

$$E = v^2 \cdot \rho \quad (1.2)$$

В масивних конструкціях, де вирішується дво- або тривимірна задача, в рівнянні приймає участь також коефіцієнт Пуассона (μ). Для контролю якості набору міцності бетонних конструкцій, в лабораторних умовах виконуються паралельні випробування бетону на стиск стандартними методами та ультразвуковим прозвучуванням. Результатом даних випробувань є встановлення тарувальних кривих, з використанням яких визначають міцність бетону в конструкціях в польових умовах.

За допомогою ультразвукового методу можливо оцінити однорідність матеріалу та виявити дефекти його структури, наявність шарів різної щільності та інше.

Перевагою даного методу є відсутність впливу арматурних стержнів, за умови що вони не потрапляють у зону прозвучування.

Головним недоліком методу ультразвукового прозвучування є обмеженість його використання для бетонів марок М-100 – М-400 [8]. Також, випробування монолітних конструкцій даним методом передбачено лише за способом наскрізного прозвучування, що робить даний метод непридатним до використання для оцінки шарів дорожнього одягу.

На сучасному етапі досить перспективним постає фазовий вібраційний метод неруйнівного контролю фізичної дії. Основною інформаційною характеристикою методу є параметри розповсюдження поверхневої хвилі типу Релея [2,4]. Даний метод був відомий ще у 50-ті роки ХХ століття, але розвиток отримав лише у 80-90 роках, обумовлений вдосконаленням вимірювальної і обчислювальної техніки для реєстрації хвиль даного типу, а також створенням математичного апарату для обробки сигналу.

Принцип дії методу полягає в наступному: при імпульсному навантаженні в шарі конструкції виникають неперіодичні коливання широкого спектру частот [9]. Відома залежність глибини локалізації поверхневої хвилі Релея та її довжини, що визначається співвідношенням швидкості до частоти. Використовуючи математичний апарат обробки інформації, будуються графічні залежності швидкості розповсюдження поверхневої хвилі Релея від частоти або довжини, які називаються дисперсійними кривими (рис. 6).

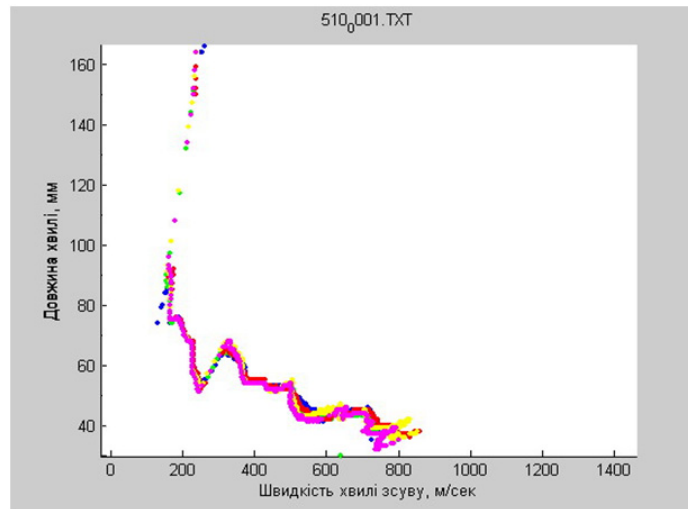


Рис. 6 – Дисперсійної крива отримана за фазовим віброакустичним методом

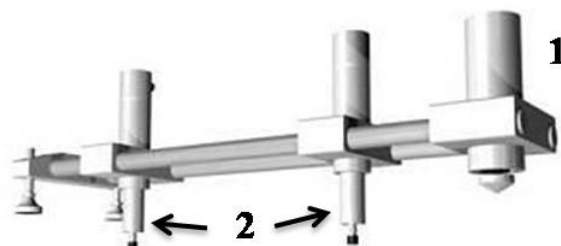
Наведена залежність є характеристикою пружних властивостей матеріалу та може бути використана при визначенні модуля пружності та товщини конструкції. Для обробки сигналу, побудови дисперсійної кривої та оцінки фізико-механічних параметрів матеріалу використовується механізм спектрального аналізу з використанням методів статистики. Ефективною математичною базою по обробці сигналу є перетворення Фур'є.

За допомогою даного методу можливе вирішення прямої та зворотної задачі інверсії. Пряма задача полягає у побудові дисперсійної кривої існуючої конструкції чи матеріалу. Рішенням зворотної задачі є побудова профілю конструкції зі встановленням фізико механічних параметрів матеріалу з вимірної експериментальної дисперсійної кривої. Дані задачі вирішуються при оцінці фізико-механічних та геометричних параметрів конструкцій в польових умовах. В лабораторних умовах виконуються випробування зразків з бетону, що задовольняють вимогам за маркою та класом проектним значенням. Результатом даних випробувань є зразкова дисперсійна крива матеріалу. Проводячи випробування конструкцій в польових умовах, отримують експериментальні дисперсійні криві. Шляхом порівняння визначають відхилення фізико-механічних параметрів конструкції від нормативних значень.

Обладнання для реєстрації та обробки параметрів розповсюдження поверхневих хвиль типу Релея складається з імпульсного навантажувача ударної дії, комплекту сейсмоприймачів та комплексу з обробки та візуалізації сигналу (рис. 7), який складається з блоку аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та персонального комп'ютера [10].

Для виконання робіт з оцінки параметрів конструкцій фазовим методом достатньо використання двох сейсмоприймачів, за наявності активного джерела навантаження. Також, можливе використання пасивного джерела

навантаження - фонова вібрація об'єкту, що передається із навколишнього середовища. В даному випадку необхідне застосування мінімум трьох сейсмоприймачів, що знаходяться в одній площині.



1 – генератор імпульсного навантаження; 2 – сейсмоприймачі; 3 – комплекс з обробки сигналу

Рис. 7 - Обладнання для реєстрації та обробки параметрів розповсюдження поверхневих хвиль типу Релея

До недоліків методу можна віднести складності з обробкою даних. Проведення випробувань потребує навичок роботи з вібримірювальним обладнанням. В цілому, даний метод постає як найбільш перспективним для використання його в якості експрес-методу неруйнівної діагностики монолітних шарів дорожнього одягу жорсткого типу. Метод не має обмежень, пов'язаних з маркою бетону. Робота виконується за умови одностороннього доступу до конструкції. Загалом, даний метод є високоінформативним (дозволяє оцінити одночасно геометричні параметри та фізико-механічні властивості матеріалу по всій товщині прозвучування), простим у застосуванні та високопродуктивним.

Література

1. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. – Х.: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете, 1986.- 152 с.
2. Фирстов В.Г., Кашкин С.К., Почтовик Г.Я. Неразрушающие методы испытания дорожных конструкций и материалов. – Москва: Транспорт, 1964. – 124 с.
3. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: Підручник. — К.: «Азимут-Україна», 2004.- 496с.
4. Почтовик Г.Я., Злочевский А.Б., Яковлев А.И. Методы и средства испытания строительных конструкций. – Москва: Высшая школа, 1973. – 158с.
5. Алешин Н.П., Лукачев В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия.- Минск: Высшая школа, 1987.— 271 с.

6. Ермолов И. И. Теория и практика ультразвукового контроля. -М.: Машиностроение, 1981.-240с.
7. Радовский Б.С. Опыт использования старого цементобетона как основания под асфальтобетонное покрытие в США. Дорожная техника и технологии. Выпуск 10. Стр. 20-32.
8. ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. Изд-во стандартов. Введен 01.01.1988 взамен ГОСТ 17624-78, ГОСТ 24467-80.
9. Nazarian, S., Stokoe, K.H., and Hudson, W.R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: Transportation Research Record, 930, p.p. 38-45.
10. S. Nazarian, D. Yuan, K. Smith, F. Ansari, C. Gonzalez. Acceptance Criteria of Airfield Concrete Pavement Using Seismic and Maturity Concepts: Appendices. Report IPRF-01-G-002-02-2. Programs Management Office 5420 Old Orchard Road Skokie, IL 60077. May, 2006. – 98 p.p.

Аннотация

Рассмотрены виброакустические методы неразрушающего контроля качества цементобетонных слоев дорожной одежды. Приведены недостатки и достоинства методов с позиции нужд дорожной отрасли. Описана последовательность выполнения работ по контролю качества цементобетонных слоев фазовым методом.

Ключевые слова: дорожная одежда жесткого типа, неразрушающий контроль качества, фазовый метод, поверхностная волна типа Релея.

Annotation

Vibro acoustic methods, advantages and limitations of this methods for nondestructive testing of Portland Cement Concrete (PCC) pavements has been considered. Workflow of nondestructive testing using phase vibro acoustic method is described.

Keywords: rigid pavement, nondestructive testing, phase vibroacoustic method, Rayleigh`s surface wave.