

ПАКЕТНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТОРКРЕТ-КАМЕННЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА

©2021г. Яо Фэй^{1,*}, Цао Иминь¹, Чен Гуанюй¹

¹Университет Хохай, Нанкин, Цзянсу, Китай

*E-mail: yaofei215@hhu.edu.cn

Поступила в редакцию 22.02.2020; после доработки 10.08.2020

Принята к публикации 14.08.2020

Изучается качество контакта торкрет-каменных структур с использованием импакт-эхометода (ИЭ) для обнаружения дефектов в торкрет-бетоне толщиной 10 и 20 см. Проведены численные и экспериментальные исследования. Традиционный анализ частотных характеристик может дать только качественную оценку, но не может количественно оценить критичность дефекта на поверхности контакта. Пакетное вейвлет-разложение используется для анализа сигнала с целью получения распределения энергии в каждой полосе частот. После этого рассчитывают относительные собственные значения энергии пакета вейвлета и получают показатель энергетической характеристики торкрет-бетона с различной толщиной и состоянием контакта. Подход к оценке качества границы раздела, основанный на энергии, применялся для количественной оценки качества контакта на поверхности раздела торкрет-каменных структур.

Ключевые слова: торкрет-бетон, качество контакта, импакт-эхометод, частотный анализ, пакетное вейвлет-разложение, показатель энергетической характеристики.

DOI: 10.31857/S013030822101005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Торкрет-бетон является жизненно важным компонентом туннельных конструкций и используется для снятия напряжения горных пород, вызванного выемкой грунта в различных геологических системах и средах. Надежная и эффективная оценка состояния торкрет-бетона является фундаментальным вопросом при строительстве и эксплуатации туннеля, который играет ключевую роль на ранней стадии строительства туннеля и после ввода его в эксплуатацию. Многие факторы могут вызвать проблемы с качеством торкрет-бетона и механическими характеристиками композитной структуры. Торкрет-бетон может отделиться от каменной основы из-за ее деформации после выемки грунта и усадки торкрет-бетона на начальной стадии отвердевания бетона. Торкрет-бетон не обеспечивает передачу напряжений и защиту самой породы [1—3], когда они разделены. Кроме того, распределение напряжений имеет сложный характер в слабых окружающих породе разрезах. Отбор керн — это самый примитивный метод контроля для изучения толщины и качества контакта торкрет-бетона, но при отборе керн вызываются необратимые повреждения конструкции, поскольку отбор обычно выполняется в самой конструкции. Однако во время отбора керн качество контакта поверхности торкрет-бетона с породами ухудшается. Следовательно, необходим эффективный метод неразрушающего контроля для оценки качества контакта туннельного торкрет-бетона.

Импакт-эхометод, являющийся эффективным экспериментальным методом неразрушающего контроля, широко используется в области контроля внутренних дефектов бетонных конструкций. М. Sansalone и Y. Lin [4—6] использовали его для экспериментов с дефектами внутреннего отслоения бетонных плит. Н. Azari [7] обнаружил, что эффективность ИЭ ограничена его чувствительностью к размерам и толщине плит. Также некоторые исследования показывают взаимосвязь между законом отражения волны напряжения и самой конструкцией, включая форму моды, размер дефекта, глубину и другие факторы [8,9].

К. Song [10, 11] оценивал качество контакта между торкрет-бетоном и окружающей каменной породой в туннеле, используя оконное преобразование Фурье импакт-эхометодом; также этот метод можно использовать для обнаружения различных дефектов торкрет-бетона. Однако состояние контакта трудно описать количественно, и невозможно определить различие между различными дефектами. N. Zoidis и E. Tatsis [12] исследовали пустоты между полом из бетона и нижележащим слоем заполнителя с помощью таких методов неразрушающего контроля, как метод импульсного реагирования и ультразвуковой импульсный метод. А. Garbasz [13] оценивал качество границы раздела при восстановлении железобетона, анализируя импакт-эхосигналы. Д.Г. Аггелис [14] использовал импакт-эхометод во время экспериментов по цементации трещин туннелей и проанализировал параметры эха. После этого был проведен дополнительный анализ для контроля дефек-

тов цементации в проходческих щитах. Было обнаружено, что частотная характеристика дефектов цементации имеет сложный вид из-за большего количества отражающих поверхностей раздела [15]. Импакт-эхометод может использоваться, чтобы обнаруживать дефекты в однослойных бетонных конструкциях и оценивать дефекты в многослойных конструкциях. Однако сложно точно судить о дефектах только на основе частотного анализа, поскольку отраженные волны имеют более сложный характер.

В последнее время для повышения эффективности контроля были применены некоторые передовые методы сбора и анализа данных. В.К. Качанов [16] применил алгоритм «фокусировки на точку» для безэталонного измерения скорости ультразвука при томографии бетонных конструкций. Повышенная точность обеспечивается устранением причины ошибок. Т.В. Фурса [17] доказала, что увеличение коэффициента затухания энергии электрических откликов в усиленном пучке может служить предвестником его надвигающегося катастрофического пробоя. Предложены критерии определения стадий разрушения железобетонных балок по параметрам электрического отклика.

В данной статье импакт-эхометод применяется к торкрет-каменным структурам с различными дефектами границы раздела. Характеристики сигнала в частотном интервале получают с использованием методов частотного преобразования. Кроме того, относительные собственные значения энергии пакета вейвлета получают с помощью анализа энергии пакета вейвлета, который обеспечивает точный показатель оценки для качества контакта границ раздела. Этот новый подход позволяет оценивать качество контакта на основе относительных энергетических характеристик пакета вейвлета по сравнению с традиционной оценкой частотного интервала в импакт-эхометод.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Каменные и бетонные материалы используются в этом эксперименте для моделирования торкрет-каменных структур. Между бетоном и камнем были установлены различные дефекты, чтобы имитировать различные условия контакта на границе раздела.

В импакт-эхометод по сигналу отражения на границе раздела исследуется дифракция и отражение волны напряжения в слоистых структурах.

2.1. Материал для исследования

Выбор материала и соотношение смеси торкрет-бетона определяется в соответствии с китайским стандартом «Технические условия по нанесению торкрет-бетона» (JGJ/T 372-2016). Размер частиц заполнителя составляет 5—10 мм, что соответствует требованиям спецификации. Состав торкрет-бетона представлен в табл. 1.

Таблица 1

Расход материала на единицу объема торкрет-бетона

Соотношение воды и цемента	Вода, кг/м ³	Цемент, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Гравий, кг/м ³
0,50	212	424	882	882

2.2. Образцы

Толщина слоя каменной породы составляет 20 см, с помощью оборудования для импакт-эхометода проверено, что скорость волны составляет 4100 м/с.

В работе толщина объекта контроля может напрямую влиять на интенсивность частоты отражения и на отражение волны напряжения на границе раздела. Поэтому были изготовлены два образца с различной толщиной торкрет-бетона. ТК-10 и ТК-20 обозначают торкрет-каменные структуры толщиной 10 и 20 см.

В работе для имитации наличия дефектов используются полиэтиленовые пенопластовые блоки. Состояние контакта на границе раздела описывается следующими тремя типами: дефект, отсутствие дефекта и отслоение, которые дальше условно обозначаются: Д, ОД и ОТС соответственно. Самая большая разница между ОТС и двумя другими типами состоит в том, что ОТС имеет частичную связь между бетоном и камнем, что похоже на соты. При частичном соединении

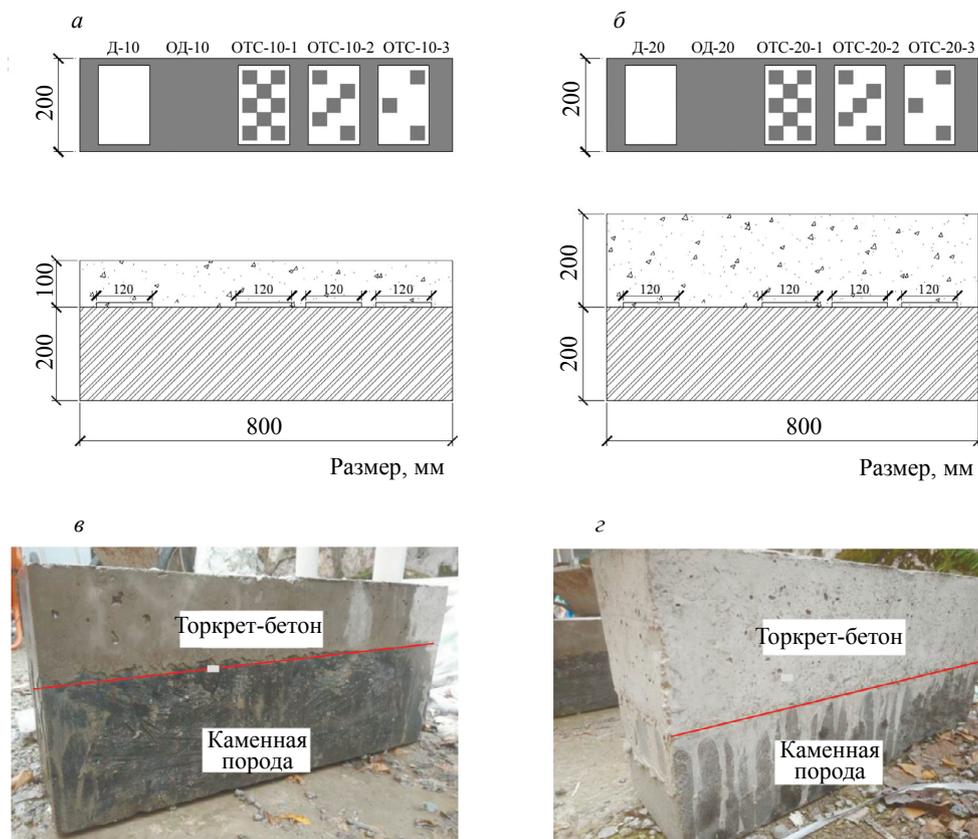


Рис. 1. Образцы: схематическая диаграмма ТК-10 (а); схематическая диаграмма ТК-20 (б); реальная схема ТК-10 (в); реальная схема ТК-20 (г).

состояние контакта на границе определяется площадью отверстий в пенопласте. Когда зона выемки в пенопласте уменьшается, с породой контактирует меньше бетона, поэтому состояние контакта меняется с хорошего на плохое. Состояния контакта нумеруются как: ОТС-1, ОТС-2, ОТС-3 с уменьшением зона выемки. Полиэтиленовый пенопластовый блок сцепляется с каменной породой с помощью клея, чтобы обеспечить фиксацию на поверхности раздела между слоем породы и бетоном, не двигаясь во время процесса вибрации. После затвердевания положение пенопласта можно хорошо зафиксировать. Схематическая диаграмма и реальная схема всех контролируемых структур показаны на рис. 1, где белые области представляют собой пенопласт.

На рис. 1а и в толщина слоя бетона в образце ТК-10 составляет 10 см, а на рис. 1б и г толщина слоя бетона в ТК-20 составляет 20 см. Каждый образец имеет 5 различных состояний контакта, которые были перечислены выше, а расположение и типы дефектов образцов точно такие же, как и у предыдущих образцов. Весь пенопласт имеет размеры 15 см × 12 см, что соответствует требованиям по минимальному размеру дефекта при различных значениях толщины в этом исследовании. Процент ОТС указывает на отношение зоны выемки пенопластовом блоке к общей площади блока. Эти зоны контроля пронумерованы в соответствии с толщиной бетонного слоя и состоянием контакта, как показано в табл. 2.

Скорость волны в бетоне зарезервированного образца была измерена, составила 3957 м / с. Акустический импеданс бетона и каменной породы показан в табл. 3.

2.3. Метод исследования и оборудование

В этой статье для контроля дефектов используется импакт-эходетектор SET-PI2-01 производства Hunan Sine Electronic Technology Co., Ltd. Частота составляет 4—15 кГц, а частота дискретизации установлена на уровне 125 кГц. Была задана длительность импульса в 128 мкс и усиление в 62 дБ. Частота выборки составляет 8 мкс, всего 1024 точки данных, а период опроса составляет примерно 8 мс.

Таблица 2

Конструкции образцов для лабораторных экспериментов

Образец	Состояние контакта	Размер дефекта, см	Толщина торкрет-бетона, см
Д-10	Дефект	15×12	10
ОД-10	Без дефекта	–	10
ОТС-10-1	50 % — отслоение	15×12	10
ОТС -10-2	69 % — отслоение	15×12	10
ОТС -10-3	82 % — отслоение	15×12	10
Д-20	Дефект	15×12	20
ОД-20	Без дефекта	–	20
ОТС -20-1	50 % — отслоение	15×12	20
ОТС -20-2	69 % — отслоение	15×12	20
ОТС -20-3	82 % — отслоение	15×12	20

Таблица 3

Акустический импеданс бетона и камня

Материал	Скорость волны V_p , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Акустический импеданс Z , кг/м·с ²	Коэффициент отражения
Бетон	3957	2350	9,3E+06	0,13
Камень	4560	2650	12,6E+06	

Импакт-эхометод не требует контактной жидкости и может осуществлять односторонний контроль по сравнению с ультразвуковым методом. После того, как импактор сгенерирует кратковременное возбуждение, упругая волна начинает распространяться внутри торкрет-структуре. Когда упругая волна встречает внутренний дефект конструкции или ее границы, происходит ее отражение из-за различных акустических импедансов граничащих сред. Датчик, расположенный рядом с источником возбуждения, принимает отраженную упругую волну и регистрирует сигнал вибрации в точке приема. Принятые переменные сигналы, которые включают время распространения и амплитуду волны, отображаются на осциллограф, и визуально может быть получен предварительный результат контроля. Более подробные результаты можно получить, если применить анализ частотно-временной области. Принципиальная схема при контроле торкрет-каменных структур импакт-эхометодом показана на рис. 2.

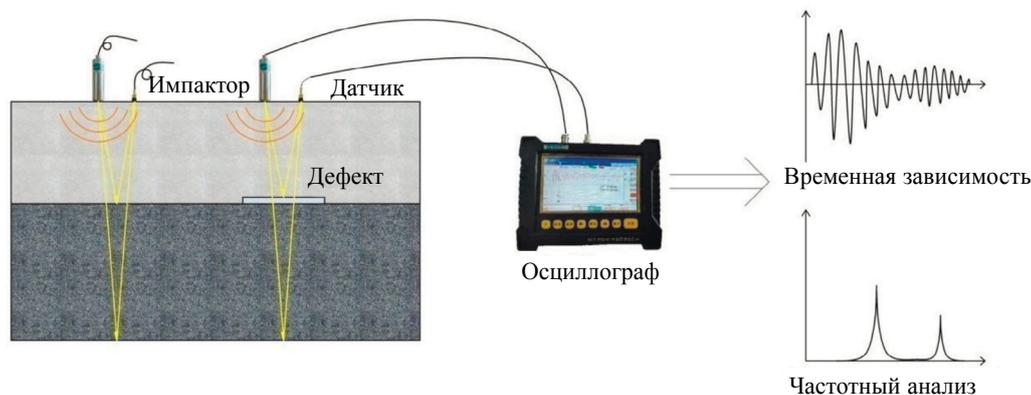


Рис. 2. Принцип метода для контроля торкрет-каменных структур импакт-эхометодом.

В этой статье источник и приемник находятся на расстоянии 3—5 см, поэтому получаемый сигнал может лучше отразить процесс распространения продольной волны, которая не подвергается слишком сильному влиянию поверхностной волны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Анализ частотных характеристик ТК-20

В ходе эксперимента было проведено 50 измерений в каждой области каждого образца, и энергетический спектр каждой контрольной точки рассчитан при различных условиях эксплуатации. В этой статье контролируемая конструкция ТК-20 используется как типичный пример для лучшего понимания. На рис. 3а, б кривые изменения ускорение—время измерены в местах с дефектами и без дефектов. Временные сигналы преобразуются в сигналы частотной области с помощью преобразования Фурье (ФП) на рис. 3в, г, поэтому различные частотные характеристики могут быть получены из диаграмм частотной области.

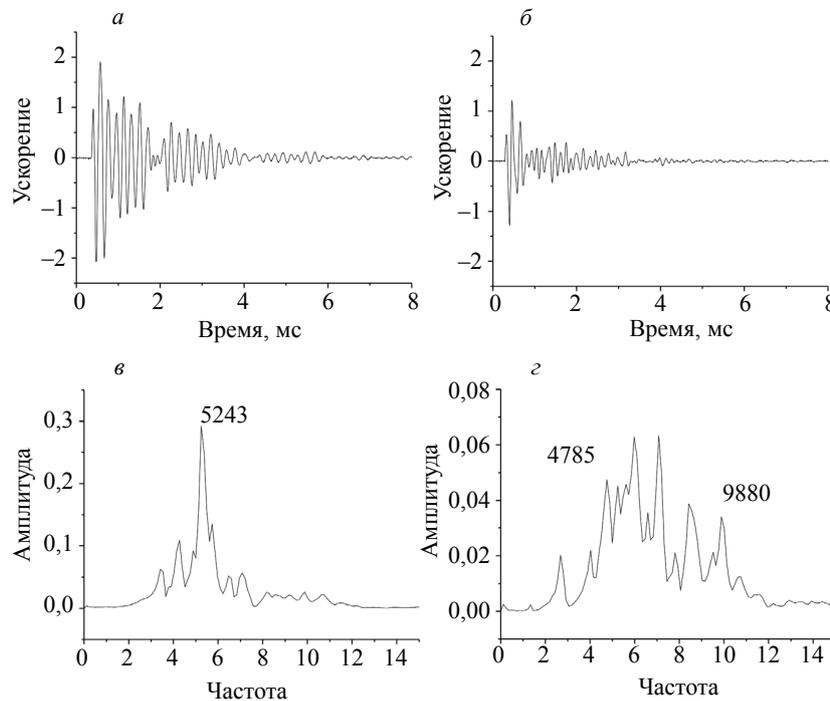


Рис. 3. Диаграммы частотной области для ТК-20: формы сигналов во временной области для ОД-20 (а); формы сигналов во временной области для Д-20 (б); АХЧ для ОД-20 (в); АХЧ для Д-20 (г).

Согласно теории импакт-эхометода [18], коэффициент отражения на границе раздела равен $R_1 = 0,13$, что указывает на то, что большая часть энергии может продолжать распространяться вниз через границу раздела бетон—камень во время прохождения упругой волны. Частоту резонанса, соответствующего толщине плиты (T -частота), можно получить из уравнения (1) и уравнения (2) с коэффициентом формы 0,96:

$$f_{T1} = \frac{\beta C_{P1}}{2T_1}, \quad (1)$$

$$f_{T2} = \frac{1}{\beta C_{P1}} + \frac{2T_2}{\beta C_{P2}}, \quad (2)$$

где f_{T1} и f_{T2} — T -частота торкрет-бетона и камня; β — коэффициент формы, который зависит от коэффициента Пуассона (μ); T_1 , C_{P1} , T_2 , C_{P2} — скорость продольной волны и толщина торкрет-бетона и камня соответственно; Δt — интервал дискретизации сигнала.

На рис. 3в на диаграмме частотной области для ОД-20 есть только один пик частоты, равный 5243 Гц. Расчетная T -частота в нижней части камня составляет 5110 Гц, что близко к пику на рисунке. Расчетная T -частота на границе слоя торкрет-бетон составляет 10,22 кГц, что не соответ-

стует рисунку. Это приемлемо, поскольку значения акустического импеданса бетона и камня схожи, что приводит к слабым отражениям на границе раздела.

На рис. 3г несколько частотных пиков появляются на диаграмме частотной области, и имеет место нечеткое распределение пиков в частотном диапазоне 4—10 кГц для случая Д-20. Самый высокий пик при частоте 9880 Гц соответствует расчетной T -частота на нижней поверхности каменной породы, а положение исходного пика может быть уменьшено до 4700 Гц. Возникает много пиков, и трудно найти соответствующие частотные характеристики этих пиков. Это указывает на то, что при наличии дефекта при распространении упругой волны могут возникать помехи, которые приводят к дифракции и другим физическим явлениям, включая изменение пути распространения и явления множественных пиков. Таким образом, трудно выделить основную частоту только через частотную диаграмму, и причина ее появления требует дальнейшего анализа с использованием теории Лэмба [19].

3.2. Частотный анализ ОТС-20

Быстрое фурье-преобразование (БФП) также было выполнено для импакт-эхосигналов, полученных с ОТС-20-1, ОТС-20-2 и ОТС-20-3 для получения спектрограммы частотной области.

На рис. 4 частота 6100 Гц найдена независимо от качества границы раздела бетон—камень для ОТС-состояния и обнаружено, что эта частота не имеет соответствующих частотных характеристик. Существует пик частоты около 5000 Гц, где частота соответствует распространению упругой волны по скальному грунту и образованию отражения. На рис. 4а есть несколько высокочастотных компонентов, которые трудно распознать. На рис. 4б частота отражения от нижней части скалы все еще доминирует в ОТС-20-2, но доля высоких частот увеличивается. На рис. 4в присутствует еще больше высокочастотных пиков, и спектрограмма выглядит более запутанной. Распределение частоты показывает характеристики в спектрограмме частотной области, аналогичные Д-20.

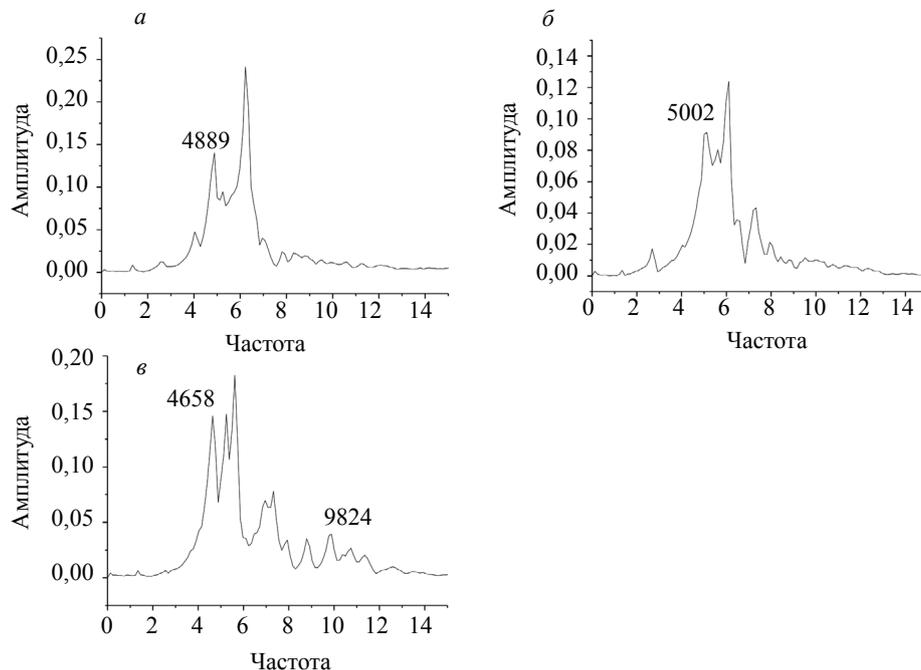


Рис. 4. Спектрограммы ОТС: АХЧ для ОТС-20-1 (а); АХЧ для ОТС-20-2 (б); АХЧ для ОТС-20-3 (в).

Другой образец под названием ТК-10 показывает ту же картину. При наличии дефектов на границе раздела частотное распределение постепенно усложняется. Можно видеть, что хотя традиционное преобразование БФП позволяет делать некоторые выводы, оно имеет много недостатков. Во-первых, граничный эффект вызывает большое количество частотных пиков, и трудно определить, есть ли дефекты в контролируемом участке. Во-вторых, БФП может дать только каче-

ственную приближительную оценку и не может предоставить количественный показатель качества контакта на границе раздела. Поэтому для улучшения анализа будет использован метод пакетного вейвлет-разложения.

4. ПАКЕТНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

4.1. Пакетное вейвлет-разложение

При пакетном вейвлет-разложении используется ортогональное разложение, и каждый сигнал полосы частот является независимым и без ошибок. Теория частотного анализа пакета вейвлета основана на теореме Парсеваля (интегральном уравнении Парсеваля). Энергия во временной области — это $L2$ -норма сигнала и энергии на j -уровне разложения:

$$E_j = \sum_{i=1}^{2^j} E_j^i, \tag{3}$$

где E_j^i означает $L2$ -норму вейвлет-коэффициентов каждого узла при j -уровне разложения, E — энергия волнового пакета. Энергия каждого субсигнала может формировать вектор энергии $E = [E_1 E_2 \dots E_j]$. Таким образом, с помощью пакета вейвлета-сигнал можно разложить в вектор-столбец из 2^j -элементов векторов.

Полная энергия сигнала представляет собой сумму энергии субсигнала в различных частотных диапазонах, а информация о повреждениях структуры содержится в энергиях узлов субсигналов в распределении энергии. Он отражает различные характеристики повреждений и требует независимой количественной оценки для точного обнаружения повреждений.

После того, как энергия неповрежденного и поврежденного узла субсигнала вычислена с помощью сигнала разложения пакета вейвлета, величина изменения энергетического спектра суммируется по уравнению:

$$\Delta E_j = \left| \frac{E_j^{DE}}{\sum_{j=1}^{2^p} E_j^{DE}} - \frac{E_j^{ND}}{\sum_{j=1}^{2^p} E_j^{ND}} \right|, \tag{4}$$

$$\Delta E = \sum_{j=1}^{2^p} \Delta E_j, \tag{5}$$

где ΔE — относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета; показатели степени Д и ОД обозначают дефект и без дефекта; индекс p обозначает количество узлов вейвлет-пакета на j -уровне разложения; ΔE_j — вычисленное значение в начале каждого узла пакетного вейвлет-разложения и их сумма — ΔE . В этом уравнении, энергия пакета вейвлета в контрольной точке на ОД-участке используется как контрольная группа (при этом, является константой) и экспериментальная группа, включающая точки на участках Д, ОТС и ОД непосредственно, при необходимости может быть изменена.

Изменение энергетического спектра каждого узла добавляется, чтобы получить окончательную относительную энергетическую характеристику как значения относительной энергетической характеристики вейвлет-пакета (ΔE), которые можно вычислить. ΔE используется для идентификации повреждений и в качестве справочного материала для анализа повреждений, чтобы определить место повреждения. Кроме того, результат может быть более точным, поскольку подобное влияние граничных условий каждой контрольной точки устраняется вычитанием. Связь между индексом признака и дефектом получается путем сравнения показателей признаков разной степени повреждения.

Пакетному вейвлет-преобразованию уделяется больше внимания в подшипниках, машиностроении и обработке металлов [22]. В последние годы он также широко используется в инженерной дефектоскопии, особенно в традиционных деревянных конструкциях и бетонных балках. Временные зависимости, полученные акустическим методом (импактором является ударная сила или акустическая волна), могут показать больше информации о повреждениях после пакетного вейвлет-разложения [23]. Кроме того, результаты пакетного вейвлет-разложения могут быть использованы в качестве эффективного стандарта оценки для искусственных нейронных сетей.

4.2. Распределение частотного диапазона экспериментальных результатов

В этой статье для разложения сигнала выбран вейвлет Добеши 5 (вейвлет db5). Уровень пакетного вейвлет-разложения равен 6, так что получается 64 частотных диапазона, что означает, что размерность вектора признаков каждой выборки равна 64. Было обнаружено, что энергия первых 20 полос составляет более 99 % от общей энергии и остальные 44 полосы оказывают незначительное влияние на оценку. Следовательно, спектрограмма распределения частотных диапазонов включает только первые 20 порядков на рис. 5.

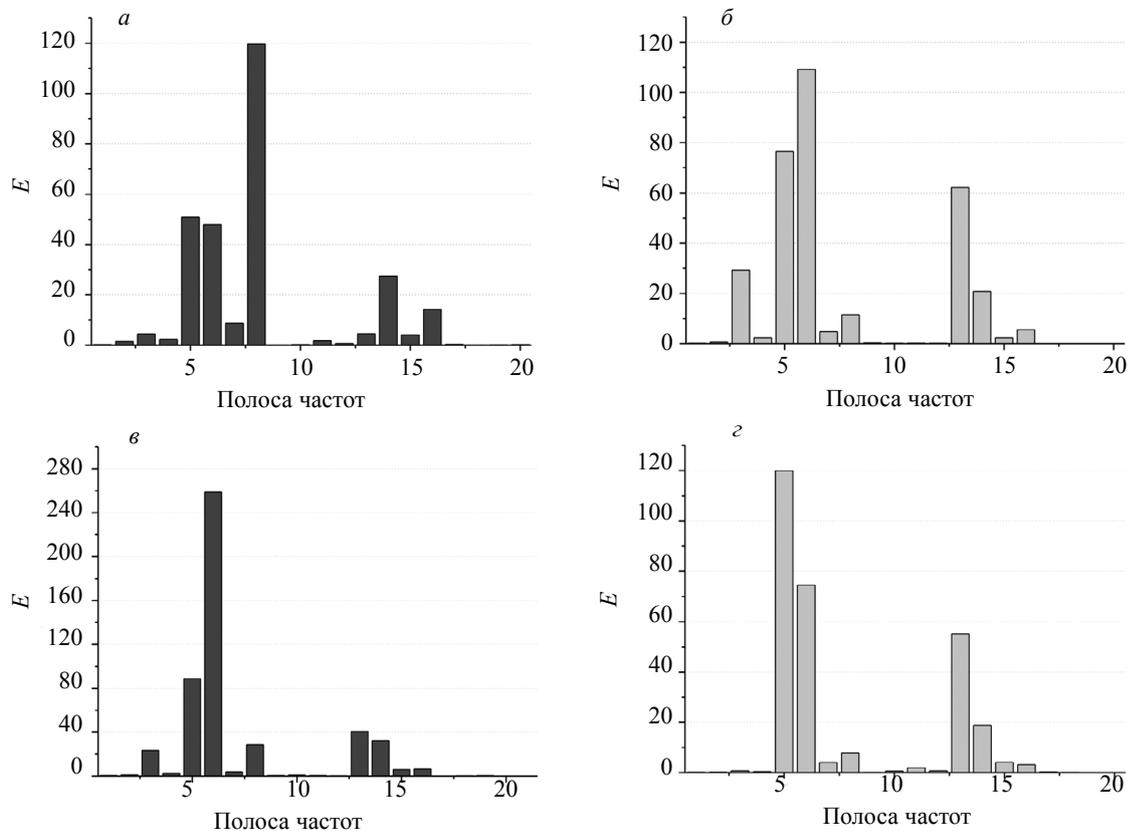


Рис. 5. Распределение энергии по полосам частот пакета вейвлета: ОД-10 (а); Д-10 (б); ОД-20 (в); Д-20 (г).

Типичное распределение полос частот показывает, что энергия каждой полосы различается в зависимости от состояния контакта. На рис. 5а пик на 8-й полосе означает, что энергия, в основном, концентрируется в относительно низкочастотной области, где состояние контакта наилучшее. Исходный пик перемещается в 6-ю полосу на рис. 5б, а высокочастотная часть увеличивается по сравнению с таковой в ОД-10. На рис. 5в большая часть энергии сосредоточена в полосе 6 и очень мало энергии приходится на высокие частоты. Однако на рис. 5г можно увидеть, что исходный пик перемещается в 5-ю полосу, а высокочастотные полосы значительно увеличиваются при ухудшении качества контактного границе раздела.

В общем, распределение полос частот резко различается между дефектной и бездефектной структурами, но между бездефектными структурами разница невелика. Если количественно оценить это различие с помощью метода, описанного в разделе 4.1, можно получить показатель качества контакта торкрет-каменных структур.

4.3. Пакетный вейвлет-анализ результатов численного моделирования

Принцип пакетного вейвлет-разложения состоит в следующем. Определяется распределение энергии, который содержит информацию о повреждении структуры, а после пакетного вейвлет-разложения импакт-эксигналов с дефектом или без него учитывается дополнительный вклад в энергию

узла. Можно рассчитать характерные значения энергии вейвлет-пакета (ΔE). На основании различия определяется факт наличия или отсутствия дефектов и затем определяется место повреждения.

Программное обеспечение MSC.MARC, реализующее метод конечных элементов, используется для создания численной модели торкрет-каменной (ТК) структуры. Толщина слоев торкрет-бетона в ТК-структуре составляет 10, 15, 20 и 25 см. Для каждой толщины было пять состояний: ОД, Д, ОТС-1, ОТС-2 и ОТС-3. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета может служить мерой качества контакта, поскольку частотное распределение импакт-эхосигналов изменяется при различных состояниях контакта. Относительная энергия вейвлет-пакета для каждой полосы частот у экспериментальных образцов вычитается из относительной энергии на соответствующей позиции частоты у контрольной группы, чтобы получить относительные собственные значения энергии согласно уравнению (4). Графики характеристической энергии каждого участка показаны на рис. 6.

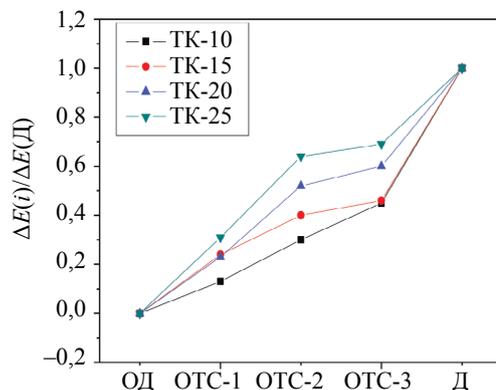


Рис. 6. Нормированные относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов.

На рис. 6 энергия вейвлет-пакета получена из результатов численного моделирования и получены относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов при различных условиях эксплуатации. В местах ОД все собственные значения равны нулю, поскольку расчет основан на том, что энергия вейвлет-пакета в бездефектном месте принята в качестве опорного значения. Результаты численного моделирования пронормированы, чтобы уменьшить разницу между относительными собственными значениями энергии вейвлет-пакетов при различной толщине бетона. Конкретный метод нормализации состоит в том, чтобы вычислить процентное отношение характеристического значения каждой области измерения к характеристическому значению области Д. Тенденции изменений идентичны, и ухудшение качества контакта будет увеличиваться, если доля относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета, то есть значение $\Delta E(i)/\Delta E(Д)$, увеличивается. Характерная частотная энергия вейвлет-пакета для трех степеней дефекта ОТС-1, ОТС-2 и ОТС-3 нелинейно возрастает. Кроме того, различная толщина торкрет-бетона влияет на относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета.

Следовательно, сигнал частотной области может быть качественно определен в соответствии со временем, когда частота появляется на частотной диаграмме ОТС-состоянии. Он также может быть дополнительно определено путем вычисления относительного собственного значения энергии вейвлет-пакета для оценки качества контакта.

4.4. Пакетный вейвлет-анализ экспериментальных результатов

Пакетное вейвлет-разложение проводится для сигнала каждого участка, и вычисляется энергия вейвлет-пакета (E). Определяется средняя энергия каждой частотной полосы в 50 точках измерения в участках ОД, результат обозначается как СРЕД. Вычисляется разница между энергией каждой полосы частот во всех участках измерения и энергией СРЕД, а затем эта разница используется для получения относительных собственных значений энергии. При многоточечном контроле относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов усредняются, чтобы окончательно получить значения энергетического спектра при всех условиях эксплуатации после того, как будут удалены точки данных с большими ошибками. Линии характеристического значения показаны на рис. 7.

На рис. 7 результаты численного моделирования и экспериментальные значения относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета ТК-10 и ТК-20 показывают, что относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета увеличивается и становится нелинейным, когда качество контакта на границе раздела в ТК-структуре ухудшается. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета Д использовались в качестве опорных значений, которые были нормированы для получения процентной доли каждой контактной массы.

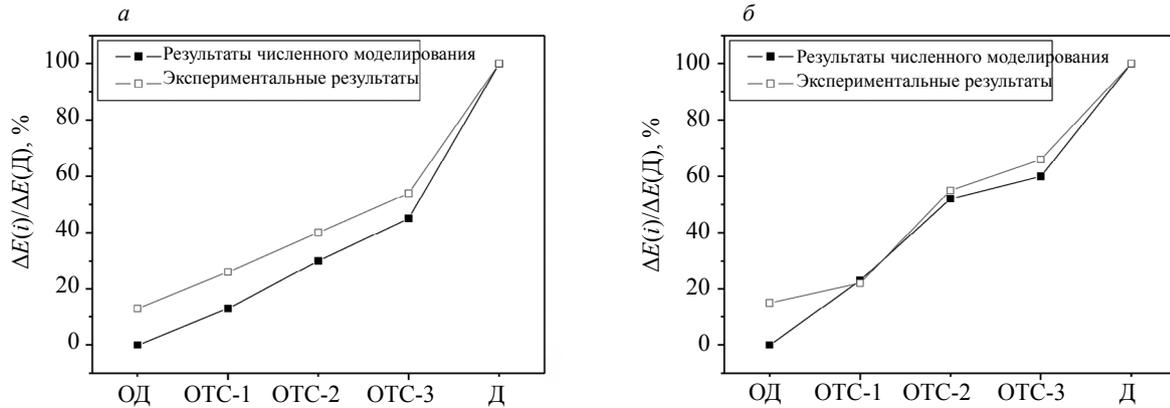


Рис. 7. Собственные значения относительной энергии вейвлет-пакетов результатов численного моделирования и экспериментов: ТК-10 (а); ТК-20 (б).

На рис. 7а формы линий после нормировки очень похожи, хотя относительные собственные значения энергии результатов численного моделирования и экспериментальных результатов различаются. При численном моделировании характеристические энергетические спектры ОД и различных ОТС нормированы на 0; 0,13; 0,30 и 0,46. Экспериментальные характеристические энергетические спектры ОД и различных ОТС нормированы на 0,13; 0,26; 0,40 и 0,54. Результаты численного моделирования относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета ТК-10 меньше экспериментальных значений, потому что бетон представляет собой сложный многонаправленный композит, а результаты измерений не так стабильны, как результаты, полученные с помощью конечно-элементного моделирования. Рис. 7б показывает ту же картину. Собственные значения численного моделирования и эксперимента очень близки, за исключением области ОД. Каждый раз наблюдается различие в импакт-эхо сигналах, что приводит к разным результатам на одном и том же участке. Следовательно, в этом случае, характеристический энергетический спектр не равен нулю для бездефектной области. Выше показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными результатами, и как численное моделирование, так и экспериментальные значения показывают, что относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета увеличивается с ухудшением качества контакта. Собственные значения вейвлет-пакетов экспериментальных результатов в ТК-10 и ТК-20 показаны на рис. 8.

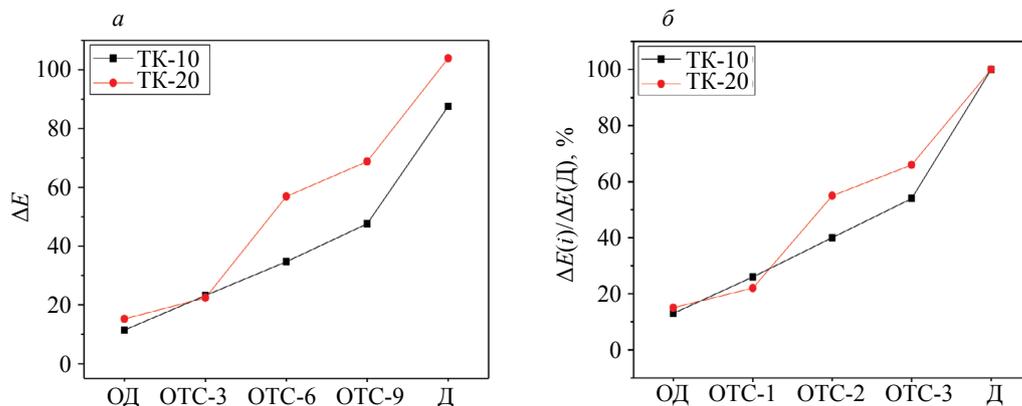


Рис. 8. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов: экспериментальные результаты (а); нормированные экспериментальные результаты (б).

На рис. 8а относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета в областях Д и ОТС увеличивается с увеличением толщины бетона, поскольку увеличение толщины бетона приводит к большой разнице в распределении энергии в полосах частот. Из рис. 8б видно, что, хотя собственные значения энергии для каждой области измерения колеблются, нормированные значения для области ОД меньше 15 %, а для области ОТС и области Д — более 20 %. Это показывает, что метод расчета собственных значений эффективно различает эти участки контроля. Этот метод анализа не требует определения наличия или отсутствия дефектов путем идентификации пиков. Ориентируясь на рис. 8а, можно предложить следующий показатель: рассмотреть индекс выше собственного значения области ОД, ниже собственного значения области Д, рядом с собственным значением ОТС-1 и определить его как показатель подозреваемого дефекта. Когда собственные значения энергии больше этого индекса, это указывает на то, что контролируемая торкрет-каменная структура может содержать дефекты, и эксперименты по определению механических свойств, проведенные позже, могут иметь некоторые ошибки. Как и в этом эксперименте, его можно принять равным 15. Конкретное значение индекса должно быть связано с уровнем энергии источника воздействия, что требует дальнейшего исследования в более поздних исследованиях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было изучено качество контакта на границе контролируемой структуры из торкрет-бетона и каменистой породы с использованием импакт-эхометода. Можно сделать следующие выводы.

Результаты численных и натуральных экспериментов показывают, что наличие дефектов может быть определено по главной частоте на границе раздела каменной породы и торкрет-бетона посредством анализа в частотной области. Однако количественно определить состояние дефектов на границе раздела невозможно.

После пакетного вейвлет-разложения получается спектр энергии частот. Когда качество контакта ухудшается, исходный пик смещается в сторону более низкой частоты. С другой стороны, высокочастотная часть увеличивается и даже приближается к исходному пику. Распределение частотных диапазонов резко различается между дефектной структурой и бездефектной структурой, но между бездефектными структурами эта разница небольшая.

Качество контакта может быть количественно определено по относительным собственным значениям энергии вейвлет-пакета при различной толщине торкрет-бетона. Относительное собственное значение энергии постепенно увеличивается, когда состояние контакта ухудшается. Хотя собственные значения энергии каждой области измерения колеблются, существует интервал между собственными значениями области ОД и собственными значениями других областей. Торкрет-каменные структуры с различным качеством контакта можно оценивать количественно, задавая показатель для интервала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследование было финансово поддержано Фондами фундаментальных исследований Централных университетов (№ гранта B200202086).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Graziani A., Boldini D., Ribacchi R.* Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005. V. 38. No. 5. P. 345—372.
2. *Lee S., Kim D., Ryu J.* An experimental study on the durability of high performance shotcrete for permanent tunnel support // *Tunnelling & Underground Space Technology*. 2006. V. 21. No. 3—4. P. 431—431.
3. *Jiang C., Fan K., Wu F., Chen D.* Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete // *Materials & Design*. 2014. V. 58. No. 6. P. 187—193.
4. *Sansalone M., Carino N.J.* Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method // *ACI Materials Journal*. 1989. V. 86. No. 2. P. 175—184.
5. *Cheng C., Sansalone M.* The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies // *Materials and Structures*. 1993. V. 26. No. 5. P. 74—285.
6. *Lin Y., Sansalone M., Carino N.J.* Finite element studies of the impact-echo response of plates containing thin layers and voids // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 1990. V. 9. No. 1. P. 27—47.
7. *Azari H., Nazarian S., Yuan D.* Assessing Sensitivity of Impact Echo and Ultrasonic Surface Waves Methods for Quality Assessment of Concrete Structures / *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board*. Washington, DC, USA, January 2014.

8. Wang J.J., Chang T.P., Chen B.T., Lin H.C. Evaluation of Resonant Frequencies of Solid Circular Rods with Impact-Echo Method // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2010. V. 29. No. 2. P. 111—121.
9. Lee I., Kwon S. H., Park J., Oh T. The effective near-surface defect identification by dynamic behavior associated with both impact-echo and flexural modes for concrete structures // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017. No.1. P. 1—9.
10. Song K.I., Cho G.C. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method // *NDT & E International*. 2009. V. 42. No. 6. P. 487—500.
11. Song K.I., Cho G.C. Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform // *International Journal of Rock Mechancis and Mining Sciences*. 2010. V. 47. No. 8. P. 1274—1288.
12. Zoidis N., Tatsis E., Vlachopoulos C., Gotzamanis A., Clausen J.S., Aggelis D.G., Matikas T.E. Inspection, evaluation and repair monitoring of cracked concrete floor using NDT methods // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 48. No. 11. P. 1302—1308.
13. Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., Kwasniewski L. On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 134. No. 3. P. 311—323.
14. Aggelis D.G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008. V. 23. No. 6. P. 629—637.
15. Yao F., Chen G. Y. Time-Frequency Analysis of Impact Echo Signals of Grouting Defects in Tunnels // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. P. 581—595.
16. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V., Timofeev D.V. Using «focusing to a point» algorithm for reference-free measurement of the speed of ultrasound in tomography of concrete engineering structures // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 6. P. 443—452.
17. Fursa T.V., Petrov M.V., Dann D.D. A method for evaluating failure in reinforced concrete under bending based on the response of electrical parameters to an impact action // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 7. P. 519—527.
18. Hsiao C., Cheng C.C., Liou T., Juang Y. Detecting flaws in concrete structures using the impact-echo method // *NDT & E International*. 2008. V. 41. No. 2. P. 98—107.
19. Gibson A., Popovics J.S. Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis // *Journal of Engineering Mechanics*. 2005. V. 131. No. 4. P. 438—443.
20. Epasto G., Proverbio E., Venturi V. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method // *Materials and Structures*. 2010. V. 43. No. 1—2. P. 235.
21. Qu H., Li M., Chen G., Sneed L.H. Multi-bandwidth wavelet transform of impact echo signals for delamination detection of thin concrete slabs // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016. V. 6. No. 4. P. 1—16.
22. Pino G., Ribas J.R., Guimarães L.F. Bearing Diagnostics of Hydro Power Plants Using Wavelet Packet Transform and a Hidden Markov Model with Orbit Curves // *Shock and Vibration*. 2018.
23. Fei C., Han Z., Dong J. An ultrasonic flaw-classification system with wavelet-packet decomposition, a mutative scale chaotic genetic algorithm, and a support vector machine and its application to petroleum-transporting pipelines // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2006. V. 42. No. 3. P. 190—197.