

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МАТЕРИАЛОВ СТАРОГО И НОВОГО БЕТОНА

У даній роботі виконана оцінка факторів, які впливають на спільну роботу старого та нового бетону, а також зроблена спроба огляду та вибору інструментів кінцево-елементного аналізу, за допомогою яких можна адекватно моделювати сумісну роботу багатошарових бетонних конструкцій.

В данной работе выполнена оценка факторов, влияющих на совместную работу старого и нового бетона, а также произведена попытка обзора и выбора инструментов конечно-элементного анализа, с помощью которых можно адекватно моделировать совместную работу многослойных бетонных конструкций.

An estimation of factors, influencing structural compatibility of old and new concretes, has been performed by authors of the paper. They have also attempted to make a review and select the instruments of finite element analysis, with the help of which it is possible to model the combined work of multi-layer concrete designs.

При проведении ремонтных работ по восстановлению железобетонных конструкций технические требования к ремонтным составам определяются целым рядом факторов, а именно: адгезионной и химической совместимостью материалов, совместимостью по коэффициенту линейного расширения, технологией ремонта, стоимостью материала и т. д. [1; 2]. Очень часто совместная работа материалов старого и нового бетона не рассматривается вообще [3]. Под совместной работой подразумевается совместимость материалов по такому параметру как прочность.

Для проведения исследований была разработана математическая модель. Расчетная схема испытания лабораторного образца для исследования совместной работы материалов старого и нового бетона представлена на рис. 1.

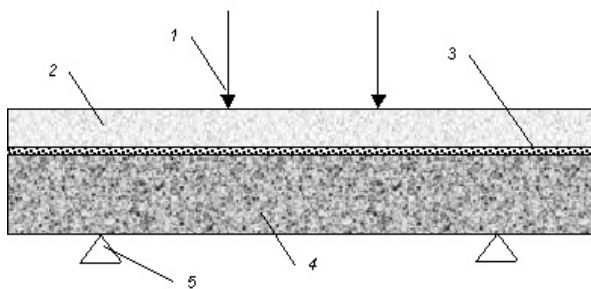


Рис. 1. Расчетная схема испытания лабораторного образца:
1 – нагрузка; 2 – новый бетон; 3 – контактный слой;
4 – старый бетон; 5 – условие опирания

Геометрическая и конечно-элементная модели исследуемого образца разработаны в препроцессоре конечно-элементной программы. На рис. 2 представлена конечно-элементная модель двухслойного образца.

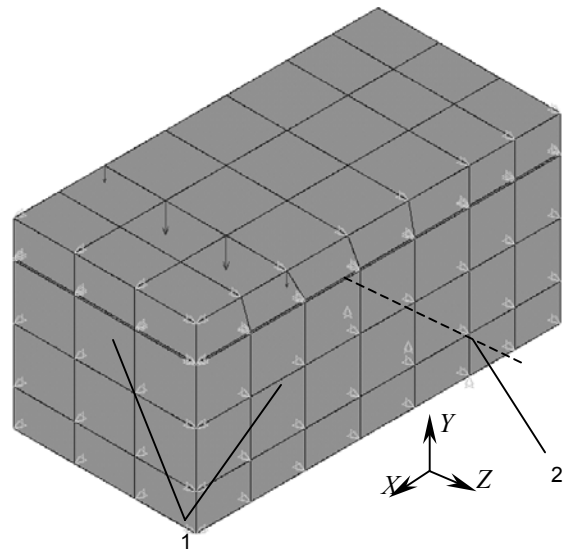


Рис. 2. Конечно-элементная модель с нагрузками и граничными условиями:
1 – симметричные граничные условия; 2 – условие опирания

Граничные условия приняты в виде запрещения по линии (показана пунктиром) перемещений по оси Y и условия симметрии по осям X и Z соответственно, как показано на рис. 2.

На первом этапе исследования проведен выбор метода моделирования условий взаимодействия слоев старого и нового бетона при приложении нагрузки. Сравнительный анализ различных условий взаимодействия слоев нового и старого бетона проведен с помощью вычислительного эксперимента.

Для моделирования условий взаимодействия слоев старого и нового бетона протестирован элемент связи. Элемент связи комбинирует параллельно свойства упругого сдвига, демпфирования и присоединенного последовательно

зазора. Масса может быть связана с одной или обоими центральными узловыми точками. Элемент имеет одну степень свободы в каждом узле или центральное смещение, вращение, давление и температура. Масса, упругость, сдвиг, демпфер и/или зазор могут быть удалены из элемента. Соединительный элемент показан на рис. 3. Элемент определяется двумя узлами, двумя упругими константами $K1$ и $K2$ (Н/м), коэффициентом демпфирования C (Н·с/м), массой M (Н·с²/м), величиной зазора GAP (м или радиан) и силой трения (ограничение скольжения) $FSLIDE$ (Н).

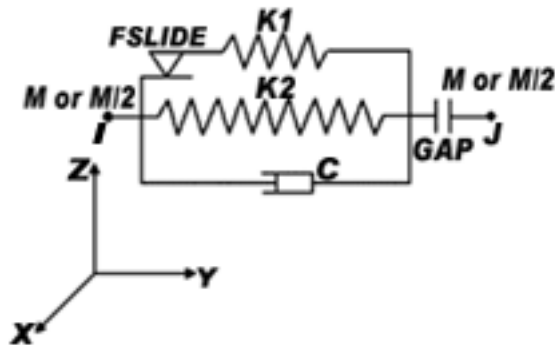


Рис. 3. Соединительный элемент

Для анализа условий контактного взаимодействия слоев двухслойного бетонного образца использованы контактные элементы типа «поверхность-поверхность». Проведен анализ напряженно-деформированного состояния двухслойных образцов из материалов нового и старого бетона. Исследованы условия совместной работы материалов с заданием b при контактом слое условий контактного взаимодействия и элементов связи. На рис. 4, 5 представлены результаты анализа. Пунктиром отображено исходное состояние ненагруженного образца. Перемещения для наглядности увеличены в 2000 раз. Нормальные к поверхности контакта перемещения для условия контактного взаимодействия:

- максимальные $-0,431 \cdot 10^{-5}$ м,
- минимальные $0,166 \cdot 10^{-5}$ м;

для элементов связи:

- максимальные $-0,434 \cdot 10^{-5}$ м,
- минимальные $0,165 \cdot 10^{-5}$ м.

Нормальные напряжения для условия контактного взаимодействия:

- максимальные сжатия $-0,165 \cdot 10^7$ Па,
- максимальные растяжения 398792 Па;

для элементов связи:

- максимальные сжатия $-0,165 \cdot 10^7$ Па,
- максимальные растяжения 365427 Па.

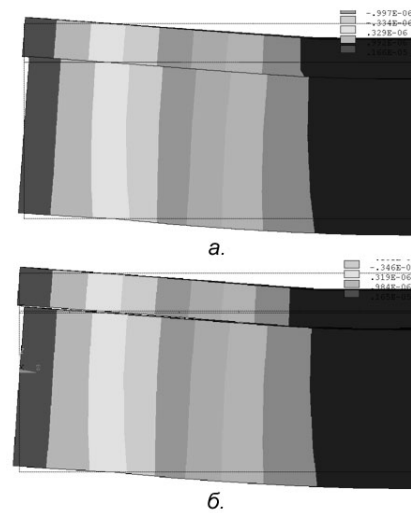


Рис. 4. Поле перемещений (м), нормальных к поверхности контакта:
а – условия контактного взаимодействия; б – элементы связи

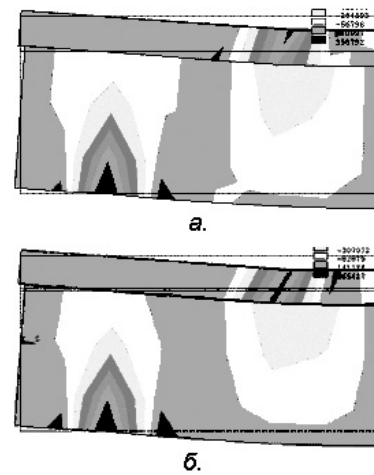


Рис. 5. Поле нормальных напряжений (Па):
а – условия контактного взаимодействия;
б – элементы связи

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния двухслойных образцов показал как качественную, так и количественную сходимость результатов расчета при задании условий контактного взаимодействия (с коэффициентом трения равным нулю) и взаимодействия слоев через элемент связи.

Для моделирования различных условий сдвиговой прочности приконтактного слоя двухслойного образца были заданы условия контактного взаимодействия между слоями с различными значениями коэффициента трения ($\mu = 0, 0,3, 0,7$).

В табл. 1 приведены численные значения параметров совместной работы: перемещений, нормальных к поверхности контакта, напряжений и интенсивности напряжений как в образце в целом, так и в отдельных его слоях.

Численные значения параметров совместной работы

Параметры	Коэффициент трения μ		
	0	0,3	0,7
Нормальные перемещения, м			
min	$-0,431 \cdot 10^{-5}$	$-0,390 \cdot 10^{-5}$	$0,334 \cdot 10^{-5}$
max	$0,166 \cdot 10^{-5}$	$0,151 \cdot 10^{-5}$	$0,131 \cdot 10^{-5}$
Нормальные напряжения, МПа			
сжатия	$0,165 \cdot 10^7$	$-0,160 \cdot 10^7$	$-0,156 \cdot 10^7$
растяжения			
– весь образец	398792	–	374952
– нижний слой	264173	251380	235171
Интенсивность напряжений, МПа			
приконтактный слой	–	$0,208 \cdot 10^7$	$0,197 \cdot 10^7$
нижний слой	$0,293 \cdot 10^7$	$0,265 \cdot 10^7$	$0,227 \cdot 10^7$

На рис. 6 приведено изменение качественной картины поля интенсивности напряжений в зависимости от коэффициента трения между слоями.

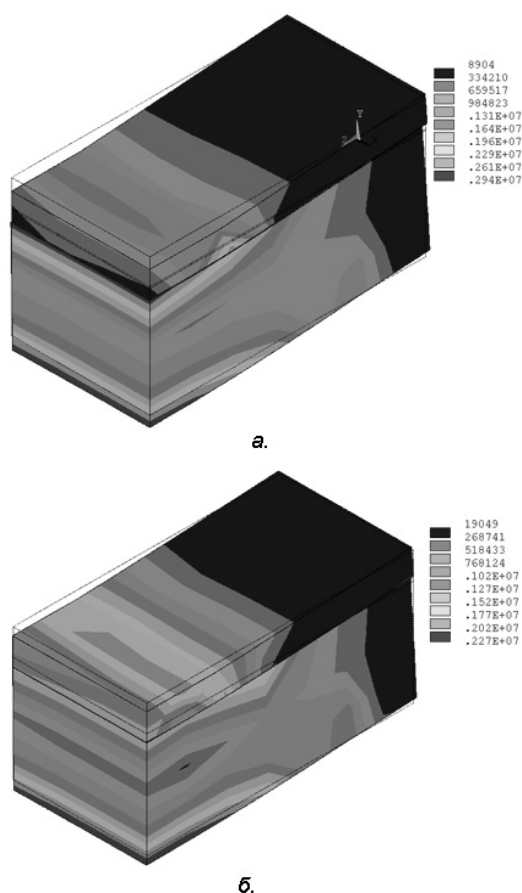


Рис. 6. Поле интенсивности напряжений (Па):
а – $\mu = 0$; б – $\mu = 0,7$

Сдвиговая прочность – один из важнейших параметров, определяющих совместную работу ремонтного состава и ремонтируемого изделия. Один из вариантов адекватного моделирования этого параметра – это задание коэффициента трения.

С целью проведения сравнительного анализа напряженного состояния двухслойных образцов при различном моделировании условий контактного взаимодействия и учёта разномодульности материалов были исследованы условия совместной работы разномодульных материалов. Модуль упругости: верхнего слоя – $2 \cdot 10^{10}$ Па, нижнего слоя – $2 \cdot 10^{10}$ Па. На рис. 7 представлены результаты анализа. Перемещения для наглядности увеличены в 2000 раз.

Перемещения, нормальные к поверхности контакта для варианта с заданием приконтактного слоя:

- максимальные $0,144 \cdot 10^{-5}$ м,
- минимальные $-0,487 \cdot 10^{-5}$ м;

для условия контактного взаимодействия:

- максимальные $-0,718 \cdot 10^{-5}$ м,
- минимальные $-0,585 \cdot 10^{-5}$ м;

для варианта с элементами связи:

- максимальные $-0,167 \cdot 10^{-5}$ м,
- минимальные $-0,587 \cdot 10^{-5}$ м.

Изменение модуля упругости ремонтного слоя при различных условиях контактного взаимодействия материалов приводит к суще-

ственно различным результатам совместной работы этих материалов.

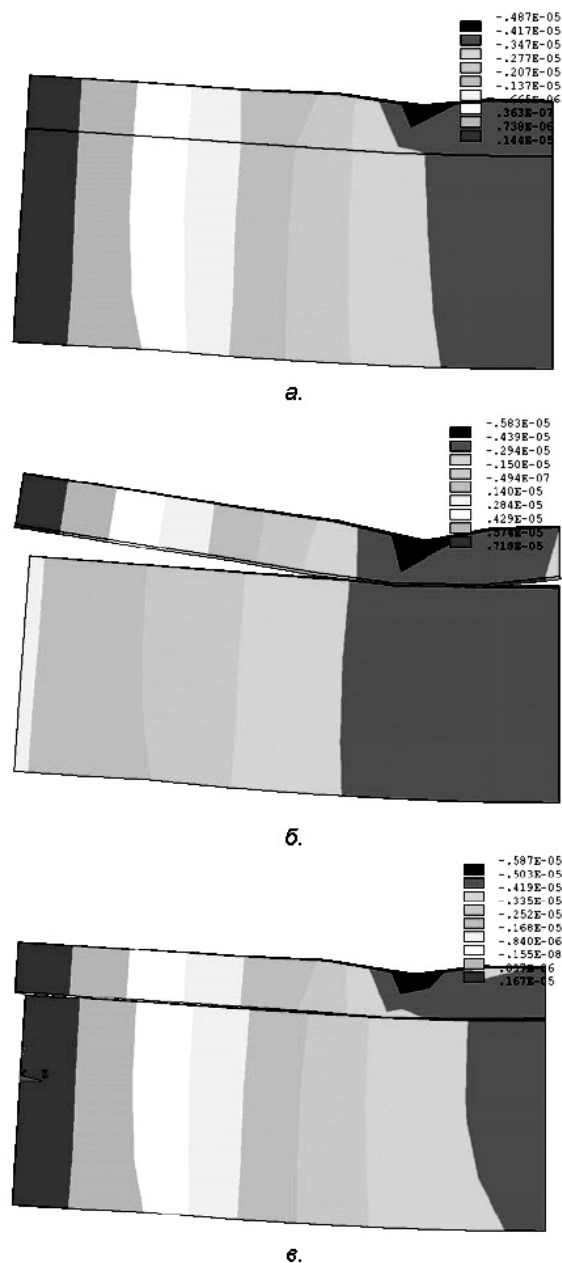


Рис. 7. Поле перемещений (м) нормальных к поверхности контакта:
а – задан приконтактный слой; *б* – задано условие контактного взаимодействия, *в* – заданы элементы связи

Для адекватного моделирования условий контактного взаимодействия многослойных бетонных образцов с помощью метода конечных элементов нужно использовать элемент, который хорошо бы работал на сжатие и на сдвиг и, кроме того, позволял бы разрыв связей

между узлами, которые он соединяет (т. е. между слоями) при достижении в нем напряжений, превышающих допустимые. Условие контактного взаимодействия между слоями бетона позволяет адекватно моделировать сжатие и сдвиговую прочность (посредством задания коэффициента трения), но не позволяет моделировать отрыв/отслоение, т. к. не предусматривает связей между поверхностями контакта. Элемент связи, в свою очередь, работает только в одном направлении (не работает на сдвиг) и, как показали исследования (сравнение с контактной задачей), работает адекватно. Элемент связи позволяет моделировать разрыв связи при достижении определённого уровня напряжений. Таким образом, ни контактный элемент, ни элемент связи не удовлетворяют в полной мере нашим требованиям для решения поставленной задачи. Один из вариантов решения этой проблемы – это модификация наиболее подходящего элемента или разработка нового элемента с заданными характеристиками на основе существующих. При определении прочностных свойств ремонтного состава также необходимо учитывать знак и величину деформаций поверхности ремонтируемого изделия (что в подавляющем большинстве случаев не делается на сегодняшний день), которые, в свою очередь, зависят от геометрии этого изделия и действующих на него нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшинько А. Н. Подводное бетонирование и ремонт искусственных сооружений: Монография. – Д.: Пороги, 2000. – 411 с.
2. Сравнительная оценка эффективности защитных покрытий бетонных конструкций, работающих в жестких климатических условиях / Е. А. Данилов, И. Б. Лозовицкий, В. Г. Челпанов // Сб. научн. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение – Д.: ПГАСА, 2003. Вып. № 25. С. 131–134.
3. Громова Е. В. Вопросы возникновения адгезионной связи в зоне контакта нового бетона со старым // Будівництво: Зб. наук. пр. – Вип. 8. – Д., 2000. – 356 с.

Поступила в редколлегию 26.01.04.