

УДК 666.965

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА

Р.В. ПУЗИКОВ, С.А. КОНОВАЛОВ, Д.Ю. ГРЕК
(Представлено: канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ)

Рассматриваются деформативные характеристики бетона и их применение в строительстве автомобильных дорог. Это является важным фактором при проектировании автомобильных дорог, так как проблема больших деформаций бетона на сегодняшний день актуальна. Для доскональной оценки деформативных характеристик бетона необходимо углубиться в сам состав монолита, в его упаковку, а также рассмотреть межпоровые каналы.

Бетон как материал для железобетонных конструкций должен обладать вполне определенными, наперед заданными физико-механическими свойствами: необходимой деформативностью, хорошим сцеплением с арматурой, достаточной плотностью (непроницаемостью) для защиты арматуры от коррозии.

В зависимости от эксплуатационных дорожных условий (горизонтальные участки, прямолинейные в плане, участки с продольным уклоном, участки на кривых в плане, участки на кривых в продольном профиле и др.), а также от режима движения (равномерное движение с постоянной скоростью, ускоренное или замедленное движение и др.) в процессе движения автомобиля по дороге на дорожную «одежду» действуют различные силы взаимодействия между колесами автомобиля и дорожной конструкцией.

К ним относятся силы, нормальные к поверхности проезжей части, и силы, касательные к поверхности проезжей части, которые в свою очередь подразделяются на силы, направленные вдоль траектории движения колес, или продольные, и силы, направленные перпендикулярно к траектории движения колес, или поперечные.

Нормальная сила давления колеса (от веса автомобиля), воздействующая на дорожную одежду, является основной расчетной нагрузкой для ее проектирования и расчета на прочность.

Под деформативностью твердых тел понимают их свойство изменять размер и форму под влиянием силовых воздействий и несиловых факторов. В соответствии с этим деформации твердых тел разделяют на силовые и несиловые. Под *несиловыми* понимают деформации, проявляющиеся вследствие нарушения гигрометрического баланса парового давления, изменения температур. Несиловые деформации (усадка, набухание, температурные воздействия) являются объемными и развиваются одинаково во всех направлениях. Свободное несиловое деформирование не сопровождается изменением напряженного состояния твердого тела. Стесненные несиловые деформации приводят к возникновению напряжений, называемых собственными напряжениями твердого тела. Эти напряжения могут служить причиной разрушения материала.

Под *силовыми* понимают деформации, проявляющиеся под воздействием внешних сил. Силовые деформации твердых тел развиваются преимущественно вдоль направления действия внутренних усилий. Они проявляются в виде сжатия, растяжения, сдвига. Одновременно с ними, как следствие продольного деформирования, возникают поперечные деформации. Деформативность твердых тел обусловлена их физической природой, поэтому разделение деформаций на силовые и несиловые, предполагающее их взаимнезависимость, является условным. В действительности силовые и несиловые деформации взаимосвязаны. Например, изменения влажности или температуры образцов приводят к изменению их механических характеристик (модуль упругости, меры ползучести) и тем самым влияют на проявление силовых деформаций.

По временной связи с напряжениями силовые деформации бывают мгновенные и запаздывающие. Мгновенные деформации фиксируют при неизменных во времени напряжениях; они развиваются одновременно с изменением напряжения, проявляются со скоростью, близкой к скорости звука, и прекращаются мгновенно, как только стабилизируются напряжения. Величина их зависит от упругопластических свойств материала, поэтому их часто называют упругопластическими деформациями.

В литературе часто при рассмотрении мгновенного деформирования материала имеют в виду однократное изменение формы и размеров тела при нагружении кратковременной нагрузкой. На самом деле всякое нагружение осуществляется во времени, поэтому неправильно сопоставлять экспериментальные результаты, полученные разными исследователями. Под мгновенным (в статическом понимании) понимают загрузку образцов с немедленным автоматическим отсчетом деформаций. Для получения запаздывающих деформаций (ползучести) необходимо одновременно испытывать серию образцов-близнецов: у одних образцов замерять общие силовые деформации, а у других – мгновенные силовые деформации. Разность между ними даст значение деформации ползучести материала. Запаздывающие деформации развиваются и при постоянных напряжениях; теоретически они стабилизируются лишь в бесконечной отдаленности, если напряжения не превышают длительной прочности материала.

В литературе принято силовые деформации условно разделять на линейные и нелинейные. Под *линейными* понимают деформации, которые пропорциональны напряжению. Линейные мгновенные деформации являются упругими. При этом должно соблюдаться требование одинаковой меры ползучести при сжатии и растяжении, загрузке и разгрузке. Под *нелинейными* понимают мгновенные пластические и запаздывающие деформации; они непропорциональны напряжениям. Под непропорциональностью связи между напряжениями и деформациями понимают следующее: если несколько образцов-близнецов нагрузить разными силами, то запаздывающие деформации, накопленные образцами за равные промежутки времени, не пропорциональны этим силам. Нелинейность деформирования твердых тел связывают с их структурными и возрастными изменениями.

С ростом прочности материала и уплотнении структуры за счет предшествующих стационарных или многократно переменных силовых воздействий условный порог нелинейности деформирования материала сдвигается в сторону нагружения. В этом одно из проявлений влияния предшествующего характера деформирования на сопротивление материала силовым нагружениям. Разгрузка материала происходит практически линейно, так как определяется упругой частью мгновенных деформаций и упругим последствием запаздывания. Деформации нагружения всегда больше, чем деформации разгрузки. Разница между ними представляет собой остаточные деформации. Доля остаточных деформаций растет с ростом уровня нагружения и падает по мере старения материала, с увеличением его прочности, после активного силового предшествующего воздействия, например, после многократно переменного нагружения.

Взаимосвязь между напряжениями, временем и деформациями, а также другими факторами, определяющими механическое состояние материалов, описывают с помощью так называемых физических уравнений. Уравнения механического состояния материалов, используемые в механике твердого тела, являются феноменологическими, т.е. построенными на базе экспериментальных данных с помощью некоторых рабочих гипотез. Как правило, эксперименты проводят над простейшими образцами при эталонных напряженных состояниях и режимах нагружения. Рабочие гипотезы представляют собой обобщение опыта и связаны с фундаментальными исследованиями естественных наук.

Бетон является материалом с ярко выраженными упругопластическими свойствами. Уже при небольших напряжениях в нем, кроме упругих (восстанавливающихся) деформаций, развиваются пластические (остаточные), зависящие от характера приложения и длительности действия нагрузки, возраста бетона и режима нагружения. Чем бетон старше, тем выше его сопротивление деформированию. Для бетона силовые деформации подразделяют на три вида: при однократном нагружении кратковременной нагрузкой, при длительном действии нагрузки, при многократно повторяющейся нагрузке.

Динамическое деформирование бетона имеет дополнительную специфику. Мгновенные деформации бетона (упругие и пластические) не связаны режимом и длительностью нагружения; они определяются лишь конечными напряжениями. Деформации ползучести бетона как запаздывающие всегда связаны режимом и длительностью приложения нагрузки; их величина уменьшается по мере увеличения возраста бетона к моменту начала нагружения.

При силовых воздействиях твердые тела деформируются. В теории деформаций бетона рассматривают относительные деформации, равные отношению абсолютного удлинения (укорочения, поворота сечения) элемента к его первоначальному размеру, измеряемому до наблюдения. Здесь вместо термина относительные деформации употребляется слово «деформации». Мерой деформаций твердых тел являются удельные деформации. В общем случае сопротивление деформированию твердых тел уменьшается с приближением действующих напряжений к пределу прочности материала, а удельные деформации растут. Удельные деформации, таким образом, являются функциями напряжений. В этом проявляется нелинейность деформирования, и это определяет нелинейную постановку задачи в теории железобетона. В частных случаях сопротивление деформированию твердых тел усредняется на всем возможном диапазоне изменения напряжений – от нулевых значений до предела прочности. Тогда считается, что удельные деформации не зависят от величины действующих напряжений. В этом – приближенная, линейная постановка задачи теории железобетона.

У материалов, чьи механические свойства меняются со временем, в частности у стареющих бетонов, мгновенные деформации, как и деформации ползучести, зависят от режима нагружения. У материалов со стабильными механическими свойствами, в частности у так называемых старых бетонов, от режима нагружения зависят лишь деформации ползучести. Подавляющее большинство строительных конструкций находятся в условиях неоднородного напряженного состояния (изгиб, внецентренное сжатие или растяжение) и величины напряжений в разных их сечениях и даже точках по сечению неодинаковы; например, у простой балки, опирающейся на две шарнирные опоры, при равномерной нагрузке наибольшие моменты и наибольшие фибровые напряжения будут посередине пролета, а наименьшие – у опор; одновременно по высоте каждого сечения на нулевой оси напряжения равны нулю и имеют экстремальные значения вблизи границы сечения (на фибровом волокне). Прямой учет многочисленной изменчивости деформативных характеристик бетона с помощью признанных методов строительной механики становится неоправданно трудоемким и поэтому не используется. На практике применяются более простые инженерные способы.

Как показывают опыты и практика эксплуатации зданий, при продолжительном действии постоянной нагрузки деформации каменных, бетонных и железобетонных конструкций не остаются неизменными, а увеличиваются во времени. Процесс деформирования остается неравновесным весьма длительное, а теоретически – неограниченное время; развитие деформаций, следуя за напряжениями, запаздывает во времени. Конечные полные деформации конструкций могут за 3–4 года в несколько раз превышать мгновенные деформации.

Ползучестью называют свойство бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций при длительном действии нагрузки. Деформации ползучести бетона обусловлены его структурными несовершенствами; абсолютная величина деформаций ползучести зависит от возраста, прочности бетона и материалов его составляющих, влажности среды и предыстории деформирования; она уменьшается по мере старения бетона, увеличения его прочности в момент нагружения и уплотнения после предшествующего многократного знакопеременного деформирования. Являясь силовой деформацией, деформации ползучести бетона тем больше, чем выше уровень напряжений. При этом скорость деформаций ползучести бетона затухает во времени, асимптотически приближаясь к нулевому значению. Наибольшую интенсивность нарастания деформаций ползучести бетона наблюдают в первые 3–4 месяца.

При стеснении деформации ползучести напряженное состояние сечения бетонного образца меняется. Доля упругих деформаций и, следовательно, величина напряжений уменьшаются, а доля деформаций ползучести бетона возрастает. Происходит замещение одних деформаций другими. Ползучесть бетона увеличивается с уменьшением размеров испытываемого образца и уменьшается с понижением водоцементного отношения, увеличением влажности окружающей среды. На деформации ползучести бетона оказывают также непосредственное влияние зерновой состав бетона, вид цемента, крупных и мелких заполнителей, технологические и многие другие факторы.

Бетоны на пористых заполнителях обладают большей ползучестью по сравнению с тяжелыми бетонами. Нелинейная ползучесть бетона обуславливает перераспределение напряжений по высоте бетонных сечений и в статически неопределимых железобетонных конструкциях. При проектировании предварительно напряженных железобетонных конструкций нормы учитывают быстроснатекающую ползучесть, под которой понимают ползучесть бетона, проявляющуюся непосредственно после нагружения бетона.

Релаксацией напряжения бетона называют процесс снижения напряжения при стеснении его деформаций. Если деформации бетона нарастают свободно, напряжения в сечениях элементов остаются постоянными. В железобетоне ненапрягаемая арматура стесняет свободное развитие деформаций ползучести бетона, поэтому напряжения в бетоне не будут оставаться постоянными. Они будут снижаться, но мере ползучести бетона, а в арматуре в связи с самоуравновешиванием – увеличиваться. Ползучесть и релаксация напряжений бетона имеют общую физико-механическую основу. Математически они взаимосвязаны и оказывают существенное влияние на работу железобетонных конструкций, испытывающих воздействие длительной нагрузки. Ползучесть бетона и релаксация напряжений (реологические свойства бетона) обуславливают рост прогибов железобетонных конструкций с течением времени, снижают предварительные напряжения в арматуре, способствуют перераспределению усилий в железобетонных статически неопределимых системах. Многократно повторные нагрузки могут иметь как статический, так и динамический характер. Статическими многократно повторными нагрузками являются такие, возрастание и снижение которых происходит медленно, а силы инерции не оказывают влияния на результаты расчета.

К динамическим многократно повторным нагрузкам относят меняющиеся во времени нагрузки, при которых нельзя пренебречь влиянием инерционных сил на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций или конструкций в целом.

К статическим многократно повторяемым можно отнести нагрузки от периодически освобождаемых хранилищ, к динамическим – нагрузки от вибрационных машин. Площадь петли означает энергию, необратимо рассеянную единицей объема тела за один цикл нагружения – разгрузки за счет несовершенства деформативных свойств материала. При повторении циклов нагрузка – разгрузка происходит постепенная выборка неупругих деформаций; при этом площадь петли гистерезиса постепенно уменьшается, достигая в пределе стабильной величины. Если при загрузке образца напряжения не превосходят предел выносливости бетона, деформации, постепенно затухая, достигают предельной величины, а стабильная зависимость между напряжениями и деформациями сохраняется при неограниченно большом числе циклов загрузки.

Снижение длительной прочности и виброползучести бетона проявляется резче с ростом уровня напряжений, асимметрии циклов и частоты колебаний и смягчаются с увеличением исходных возраста и класса бетона. Указанные изменения механических свойств бетона существенно влияют на несущую способность и деформативность железобетонных конструкций, поэтому их учитывают при расчетах.

Под предельными деформациями бетона при растяжении (или сжатии) понимают относительные средние удлинения (или укорочения) в момент разрушения центрально-растянутых (центрально-сжатых) образцов, испытанных по государственному стандарту. Предельная растяжимость бетона 0,1...0,2 мм/м длины образца. Предельная растяжимость увеличивается при влажном хранении (примерно вдвое) с уве-

личением длительности приложения нагрузки и уменьшается с повышением прочности и плотности бетона. От предельной растяжимости бетона зависит сопротивляемость растянутых зон сечений железобетонных элементов образованию трещин.

Предельное относительное укорочение бетона в 10...20 раз больше его предельного относительного удлинения и составляет 0,8...4 мм/м длины образца. Предельная сжимаемость бетона в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов достигает 0,003...0,005. При уменьшении ширины сечения к низу, особенно в тавровых сечениях с полкой в сжатой зоне, уменьшается, а при уменьшении высоты сжатой зоны сечения – увеличивается.

У бетонов на пористых заполнителях предельная сжимаемость и растяжимость бетона примерно в два раза выше, чем у тяжелых бетонов тех же марок. Предельные поперечные деформации бетона при сжатии и растяжении определяют соответственно по предельным продольным относительным деформациям сжатия и растяжения посредством коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуассона) $\nu = 0,2$. Рост поперечных деформаций как при сжатии, так и при растяжении способствует образованию в бетоне микротрещин. Это отрицательно сказывается на морозо- и коррозиостойкости бетона.

Процедура получения полной диаграммы деформирования бетона при сжатии (рис. 1) на первый взгляд выглядит несложной. Для этого опытный бетонный образец, оснащенный измерительными приборами для регистрации продольных деформаций необходимо поместить в испытательную машину, создающую осевую нагрузку. Измерение продольных деформаций в процессе нагружения производят, например, при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, устанавливаемых на базовой длине l_0 . В качестве материала упругой полоски выбрана алюминиевая фольга А1 0.10 * 450 ГОСТ 618-62 (толщина 0,1 мм), изготовленная из технического алюминия марки АД по ГОСТ 4784-49 тип М – мягкая, отожженная, модуль упругости $7,1 \cdot 10^5$ кг/см² (Алюминиевая фольга ГОСТ 618-62). После исследования физико-механических характеристик фольги на нее наклеивались восемь тензодатчиков: четыре с базой 200 мм и сопротивлением 200 Ом типа ПКБ-20-200 и четыре тензодатчика того же типа, но с базой в 100 мм и сопротивлением 100 Ом. Наклейка датчиков на фольгу производилась по типовой технологии.

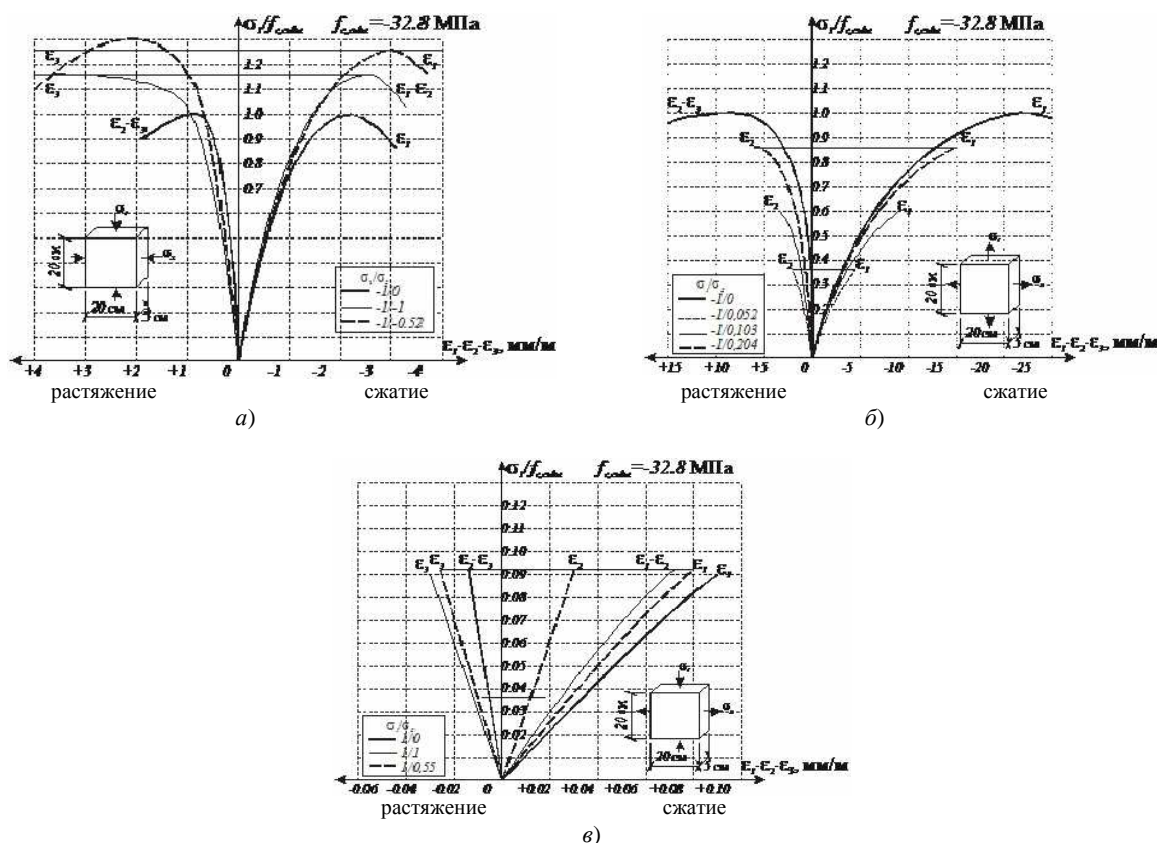


Рис. 1. Зависимости «напряжения – относительные деформации»:
 а – в условиях двухосного сжатия; б – в условиях двухосного растяжения;
 в – в условиях комбинации напряжений сжатия растяжения

В соответствии с положениями норм по проектированию железобетонных конструкций диаграмму деформирования (состояния) бетона, устанавливающую связь между напряжениями и продольными от-

носительными деформациями бетона при кратковременном действии однократно приложенной нагрузки вплоть до установленных ее предельных значений, отвечающих разрушению бетона при однородном напряженном состоянии, следует рассматривать в качестве обобщенной характеристики механических свойств бетона (рис. 2).

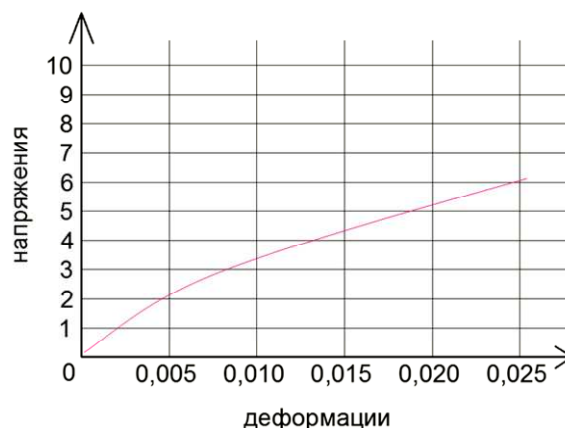


Рис. 2. Зависимость напряжений от деформаций

Источник: собственная разработка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салль, А.О. Возможности и пути повышения качества щебеночных оснований / А.О. Саль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://library.stroit.ru/articles/sheben/>. – Дата доступа: 29.10.2013.
2. Кейльман, В.А. Из опыта комплексных экспериментальных исследований и испытаний элементов дорожных сооружений на прочность и долговечность в условиях Юга РСФСР / В.А. Кейльман, А.С. Недодаев // Экспериментальные исследования инженерных сооружений. – Новочеркасск, 1969. – С. 171–173.
3. Мурзенко, Ю.Н. Экспериментальные исследования инженерных сооружений / Ю.Н. Мурзенко // Основные принципы моделирования совместной работы фундаментов и песчаного основания / Ю.Н. Мурзенко. – Новочеркасск, 1969 – С. 85–93.
4. Технология строительного производства: учебник для вузов / Л.Д. Акимова [и др.]; под ред. Г.М. Бадина, А.В. Мещанинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987.
5. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве: науч. тр. / Саратов. политехн. ин-т; под ред. В.И. Соломатова. – Саратов, 1981. – С. 5–9.
6. Рыбьев, И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ (искусственные строительные конгломераты) / И.А. Рыбьев: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 309 с.
7. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский [и др.]. – Киев: Будівельник, 1983. – С. 3–143.
8. Тулаев, А.Я. К проблеме уплотнения зернистых материалов / А.Я. Тулаев // Строительство и архитектура. Серия 1 / Новосиб. инженерно-строительный ин-т им. В.В. Куйбышева, 1980. – С. 81–86.
9. Bartos, M.I. Конструкции из армированного грунта / M.I. Bartos // Строительство и архитектура. Серия 8, Строительные конструкции. Строительная физика: науч.-техн. рефератив. сб. / под ред. О.М. Попковой. – М., 1979. – № 9. – С. 47–52.
10. Синюков, А.Д. Прочность и жесткость заделки полосовых анкеров в бетоне / А.Д. Синюков // Совершенствование технологии и расчета железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / НИИЖБ. – М.; б. и., 1984. – С. 89–100.
11. Определение прочности образцов армированного грунта / Экспресс-информация. Серия 8, Строительные конструкции (отечественный опыт). – М., 1985. – Вып. 1. – С. 13–16.
12. К вопросу об устройстве анкерных систем в толще грунта // Intern. Construction, 1985. – Vol. 24, № 6. – С. 18–19.
13. Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел / под ред. М.Л. Дубинина. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 296 с.
14. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Высш. шк., 1987. – 164 с.