

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДЕФОРМАТИВНО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ
СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Безгодов И.М.

*Старший научный сотрудник кафедры «Испытания сооружений»
Московского государственного строительного университета*

Цетков К.А.

*Инженер кафедры «Испытания сооружений»
Московского государственного строительного университета*

Расчеты массивных гидротехнических сооружений, защитных оболочек, подземных сооружений на динамическое (сейсмическое) воздействие требуют знания деформативно-прочностных характеристик бетона, находящегося в условиях сложных напряженных состояний. Из предшествующих исследований (в основном для случая одноосного сжатия и растяжения или растяжения при изгибе) известно, что механические характеристики бетона при динамическом нагружении существенно повышаются в зависимости от скорости нагружения, поэтому в рамках динамической теории следует использовать механические характеристики бетона, определенные в условиях соответствующих динамических испытаний.

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом отсутствуют нормативные документы, которые отражали бы вид напряженного состояния при динамических воздействиях, а это в свою очередь ограничивает возможности в полной мере использовать повышенные характеристики прочности бетона при двух- и трехосном сжатии. При анализе напряженно-деформированного состояния также требуется знание коэффициентов запаса отдельных зон с целью оптимизации расчета сооружения.

На пути разработки критериев динамической прочности и физических уравнений в объемной постановке довольно много нерешенных задач.

Одной из основных задач всякого экспериментального исследования является методика проведения эксперимента. Чем основательней проработаны методические вопросы, тем выше надежность полученных экспериментальных данных. Именно методика эксперимента часто является причиной некорректных результатов исследований.

Трудность разработки критериев динамической прочности и физических уравнений в объемной постановке усугубляется особенностями поведения бетона под нагрузкой. Такие явления, как силовая анизотропия, упрочнение бетона и существенное различие в прочности на сжатие и растяжение не позволяют разработать единого корректного критерия прочности для всех напряженных состояний.

В реальных условиях бетон конструкций и сооружений находится под воздействием статических нагрузок различной интенсивности в течение длительного времени. За время действия длительной нагрузки невысокого уровня (до нижней границы трещинообразования при сжатии R_{crc}^0) в бетоне происходят релаксация напряжений в местах концентраций и их перераспределение. Вследствие этого, поле напряжений в структуре материала выравнивается за счет ползучести бетона. При высоких уровнях напряжений под воздействием длительной нагрузки в бетоне образуется система мелких трещин, которые не дают одна другой развиваться, создавая самоторможение. При воздействии динамической нагрузки на конструкции и сооружения существующее в них напряженно-деформированное состояние от действия статической нагрузки существенно сказывается на коэффициенте динамического упрочнения $k_{b,v}$ бетона. Этот факт некоторые исследователи пытались связать с изменением $k_{b,v}$ в зависимости от относительного уровня напряжений σ_1/R_b и скорости нагружения [1-3]. Причем, в [1, 2] утверждается, что чем выше уровень обжатия бетона, тем меньше $k_{b,v}$. Автор объясняет это тем, что пластические свойства бетона под воздействием длительной нагрузки снижаются, тем самым приводя к снижению $k_{b,v}$. Длительность выдерживания под действием статической нагрузки составляла один час, что явно недостаточно для полного проявления деформаций ползучести, которые в несколько раз выше той, что проявляется в течение часа.

В работе [3] образцы-призмы были загружены длительной относительной нагрузкой σ_1/R_b , равной 0,25, 0,45 и 0,65 в течение нескольких недель. Затем они были разгружены и в дальнейшем испытаны на импульсную динамическую нагрузку. Автор доказывает, что по мере увеличения уровня предварительного нагружения коэффициент динамического упрочнения увеличивается и при уровне 0,65 R_b его значение на 12% повышается по сравнению с ранее незагруженными образцами.

Повышение прочности бетона можно объяснить как результат выравнивания поля напряжений в сечении образца под воздействием длительно действующей нагрузки, в результате чего концентрация напряжений при последующем действии динамической нагрузки была снижена.

Мы в своих опытах в условиях предварительного кратковременного ступенчатого нагружения с пятиминутной выдержкой на ступени до уровня 0,1 и 0,6 R_b и дальнейшего динамического приложения нагрузки также получили увеличение $k_{b,v}$. В табл.1 представлены результаты этих опытов.

Как видно из табл. 1, при практически одной и той же скорости нагружения время действия нагрузки уменьшается, а $k_{b,v}$ увеличивается с 1,16 при 0,1 R_b до 1,26 при 0,6 R_b .

Таблица 1

Вид нагружения	Прочность R_b , МПа	Время нагружения τ , с	Скорость роста напряжений σ^* , МПа/с	Коэффициент динамического упрочнения $k_{b,v}$
Статика	17,57	–	–	1
Статика $0,1R_b$ + динамика	20,41	0,068	293	1,16
Статика $0,6R_b$ + динамика	22,16	0,043	260	1,26

Из вышесказанного можно заключить, что наиболее корректным были бы результаты экспериментов, при которых бетонные образцы загружались бы длительной нагрузкой различной интенсивности в течение нескольких месяцев и последующим приложением динамической нагрузки, без предварительной разгрузки. Но подобные опыты весьма сложно осуществить.

Исследования прочностных и деформативных характеристик бетона при динамических воздействиях неразрывно связаны с испытательными стендами и методикой регистрации усилий и деформаций.

Для однократного динамического нагружения часто используются копры с падающим грузом (бабой) [4, 5]. Применяют копры как со свободно падающим грузом, так и с грузом, падающим по направляющим. В вертикальных копрах образец устанавливают на опоры и разрушают падающим с определенной высоты грузом известной массы. Недостаток известной конструкции состоит в том, что для увеличения нагрузки требуется повышать высоту и массу груза, что существенно сказывается на габаритах и массе стенда, требующего отдельного виброзащитного фундамента. Кроме того, затруднительно проводить испытания при времени нагружения 0,1-1,0 с и использовать данные стенды для статических испытаний.

В Лаборатории экспериментальной механики бетона МГСУ авторами была разработана серия испытательных стендов, позволяющих проводить динамические и кратковременные испытания на сжатие, растяжение и растяжение при изгибе бетонных образцов-призм. Дополняя стенды мембранными установками, можно проводить испытания при сложных напряженных состояниях в условиях двух- и трехосного сжатия, напряженных состояниях «сжатие-растяжение» и «два сжатия-растяжения», где осевая нагрузка может прикладываться как статически, так и динамически. Стенд для испытаний на растяжение при изгибе может быть дополнен навесным оборудованием для приложения статической сжимающей или растягивающей нагрузки вдоль оси образца-призмы с последующим воздействием

динамической нагрузки как сосредоточенной, так и распределенной в поперечном направлении.

Основным узлом рассматриваемых стенов является мультипликатор (устройство для увеличения нагрузки в гидродомкрате) (рис. 1). Данное устройство устанавливается между испытываемым образцом и грузом, падающим по направляющему, и состоит из двух цилиндров: малого (1), в котором перемещается поршень (2) под действием падающего груза (3), и большого (4). Большой цилиндр по сравнению с малым имеет во много раз большую площадь, но малое перемещение поршня (5). При равном давлении масла в двух цилиндрах получается значительный выигрыш в силе за счет разности площадей малого и большого цилиндров.

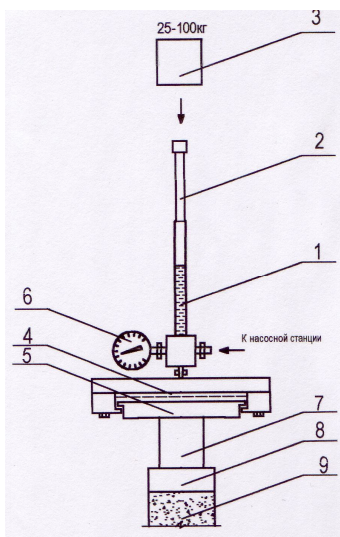


Рис. 1. Мультипликатор:

- 1 – малый цилиндр; 2 – поршень малого цилиндра; 3 – груз;
- 4 – большой цилиндр; 5 – поршень большого цилиндра; 6 – манометр;
- 7 – датчик силы; 8 – торцевая пластина (оголовок); 9 – образец

В результате использования данного устройства появляется возможность при незначительном падающем грузе (25-100 кг) достигать усилия в большом домкрате до 30-35 т. Варьируя площадью плоского домкрата, можно запроектировать динамические стенды различной мощности, причем масса стенов невелика 150-400 кг и не требует отдельного фундамента, что позволяет устанавливать их на междуэтажное перекрытие.

На рис. 2 представлен динамический стенд для испытания бетона на сжатие. Он состоит из несущих плит (1, 2), связанных между собой

шпильками (3). На нижней несущей плите установлен сферический шарнир (4), на который устанавливается бетонный образец (5). К верхней несущей плите закрепляется плоский гидродомкрат (6), а к его поршню, который одновременно является плавающим шарниром, монтируется датчик силы (7). Плоский гидродомкрат через распределитель (8) связан с малым цилиндром (9), внутри которого помещен поршень (10). В верхней части поршня закреплен сферический шарнир (11). Шпильки несущих плит связаны со шпильками, поддерживающими ограничительную плиту (12), которая служит упором при движении падающего груза (13). Для гашения ударной нагрузки на ограничительную плиту укладываются прокладки из пористой резины (14).

Стенд для испытаний на растяжение принципиально не отличается от стенда на сжатие, кроме как использованием в конструкции стенда принципа реверсирования (изменения направления усилия), благодаря чему создаются растягивающие напряжения в образце.

Регистрация нагрузки и деформаций производилась с использованием многоканального усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), ПЭВМ и специального программного обеспечения. Программное обеспечение, разработанное ЗАО «Руднев-Ширяев» (г.Москва), позволяло фиксировать получаемую информацию в виде графиков, отображаемых на экране, и таблиц, в которых один из столбцов содержит значения времени, а остальные столбцы – соответствующие им величины напряжений (в милливольтгах) или коды АЦП.

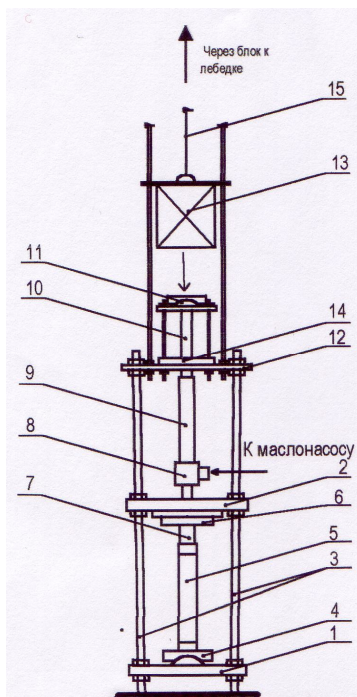


Рис. 2. Стенд для динамических испытаний бетона на сжатие:

- 1, 2 – несущие плиты; 3 – шпильки;
- 4 – нижний сферический шарнир;
- 5 – бетонный образец; 6 – плоский гидродомкрат; 7 – датчик силы;
- 8 – распределитель; 9 – малый цилиндр;
- 10 – поршень; 11 – верхний сферический шарнир;
- 12 – ограничительная плита; 13 – груз;
- 14 – прокладка из пористой резины;
- 15 – стальной трос

Испытания проводились по следующей методике. После установки образца-призмы между опорами, центрирования по физической оси и ступенчатого нагружения в упругой зоне с целью оценки статического модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации ν , производится подготовка к динамическому нагружению. Для этого необходимо поднять груз на заданную высоту и зафиксировать с помощью стопора. Через распределитель в малый и большой цилиндры подается масло. Малый поршень выходит из цилиндра. После запуска регистрирующей аппаратуры сбрасывается груз на поршень, который поднимает давление в цилиндрах и создает необходимую нагрузку для разрушения образца. После соприкосновения падающего груза с ограничительной плитой дальнейшее повышение давления прекращается.

В настоящее время проведены испытания бетона в условиях статического и динамического нагружения при одно- и двухосном сжатии, а также при одноосном растяжении и напряженном состоянии «сжатие-растяжение». В этих экспериментах для сложных напряженных состояний осуществлялось сложное нагружение. На первом этапе проводилось ступенчатое статическое нагружение в направлении σ_2 до проектного уровня, а затем статическое или динамическое нагружение до разрушения в направлении σ_1 . При испытаниях в условиях одно- и двухосного сжатия использовался бетон с призменной прочностью $R_b = 20,5$ МПа и начальным модулем деформаций $E = 28\,800$ МПа. В случае одноосного растяжения и напряженного состояния «сжатие-растяжение» – $R_b = 31,5$ МПа, $R_{bt} = 2,95$ МПа и $E = 36\,880$ МПа.

Некоторые результаты испытаний в условиях динамического нагружения представлены в табл.2.

Результаты экспериментов показали, что используемое испытательное оборудование позволяет осуществлять динамическое нагружение бетона при повышенных скоростях. При этом скорость роста напряжений остается практически постоянной на всем протяжении удара, а скорость роста продольных деформаций возрастает по линейному закону.

Как видно из табл.2, возрастание прочности бетона при двухосном сжатии по мере увеличения σ_2 приводит к увеличению продолжительности удара. При этом скорость нагружения остается практически постоянной. В случае напряженного состояния «сжатие-растяжение» прочность на растяжение по мере увеличения σ_2 изменялась незначительно, и все параметры удара ($\tau; \sigma; \varepsilon$) оставались практически неизменными.

Дальнейшая обработка результатов эксперимента в условиях двухосного напряженного состояния позволит более детально оценить влияние динамического нагружения на деформативно-прочностные характеристики бетона.

Таблица 2

Вид напряженного состояния, уровень бокового обжатия	Средняя динамическая прочность R_d , МПа	Параметры удара		
		Время разрушения τ , с	Средняя скорость роста	
			напряжений * σ , МПа/с	продольных деформаций * ε , $1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$
Одноосное сжатие	23,97	0,060	404,5	1,94
Двухосное сжатие ($\sigma_2=0,2R_b$)	30,89	0,087	358	2,44
Двухосное сжатие ($\sigma_2=0,4R_b$)	33,97	0,096	365	2,29
Двухосное сжатие ($\sigma_2=0,6R_b$)	35,04	0,087	394	2,52
Одноосное растяжение	4,1	0,057	66,3	0,18
«Сжатие-растяжение» ($\sigma_2=0,15R_b$)	4,35	0,061	67,0	0,18
«Сжатие-растяжение» ($\sigma_2=0,3R_b$)	3,91	0,053	68,3	0,20
«Сжатие-растяжение» ($\sigma_2=0,45R_b$)	3,53	0,048	69,3	0,19
«Сжатие-растяжение» ($\sigma_2=0,6R_b$)	3,16	0,041	69,9	0,21

Библиографический список

1. Кириллов А.П. Прочность бетона при динамических нагрузках // Бетон и железобетон. – М.: Лада, 1987. №2. – С.38-39.
2. Кириллов А.П. Динамическая прочность бетона // Динамическая прочность и долговечность железобетонных конструкций: Сб. научн. тр./ Под ред. В.А. Рахманова. – М.: ВНИИЖелезобетон, 1989. – 223 с.
3. Бродский В.В. Сопротивление динамическим импульсным воздействиям предварительно напряженных бетонных элементов и железобетонных колонн: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ростов-н/Д., 2001. – 24 с.
4. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.
5. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн.2. – 439 с.