УДК 624.012.45:620.191/192

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИОПОРНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ

Дорофеев В.С.,*д.т.н., проф.,***Карпюк В.М.,***д.т.н., проф.,*
Неутов А.С., *асс.,***Неутов С.Ф.,** *к.т.н., доц.*

Одесская государственная академия
строительства и архитектуры, Украина

Нет сомнений в том, что железобетон еще на многие десятилетия останется основным конструктивным материалом для строительства. Повышение эффективности, надежности и долговечности железобетонных конструкций невозможно осуществить без совершенствования и развития практики проектирования железобетонных элементов.

Известно, что несущая способность приопорных участков балочных железобетонных элементов, находящихся в сложном напряженном состоянии, очень часто является определяющим фактором при проектировании конструкций. Вместе с тем работа этих участков до настоящего времени остается не до конца изученной. В связи с этим, в Одесской государственной академии строительства и архитектуры под руководством проф. Карпюка В.М. более 10 лет назад начаты комплексные системные экспериментальные исследования обычных, предварительно напряженных и статически неопределимых балок постоянного и переменного по высоте сечения с учетом действия внецентренно приложенных, растягивающих и сжимающих продольных сил, а также изгибающих и крутящих моментов[1,2,3]. Однако, все вышеперечисленные исследования, как, впрочем, и исследования других авторов, проводились при кратковременных нагружениях, т.е. до настоящего времени напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость и несущая способность приопорных участков пролетных железобетонных элементов при длительном действии нагрузки остаются недостаточно изученными.

Вышесказанное свидетельствует об актуальности проводимых исследований прочности, жесткости и трещиностойкости приопорных участков изгибаемых железобетонных элементов с учетом их длительного нагружения.

Предварительно проведенные исследования показали, что напряженно-деформированное состояние приопорных участков железобетонных элементов зависит от ряда конструктивных факторов, а именно:

- класса бетона;
- пролета среза;
- процента поперечного армирования в пролете среза;
- процента продольного армирования в сжатой зоне;
- процента продольного (рабочего) армирования в растянутой зоне.

С целью рационального учета этих факторов, опытные образцы были изготовлены по пятифакторному трехуровнему, близкому по свойствам к Д-оптимальному плану типа На5, обеспечивающему одинаковую точность прогнозирования выходного параметра в области, описываемой радиусом, равным 1 относительно нулевой точки. По причине существенной продолжительности эксперимента (до400 суток) использовался неполный план указанного типа, а только его «ядро».

В таблице 1 представлены выбранные факторы, уровни их варьирования и основные параметры принятых образцов-балок.

Перед началом основных испытаний был проведен ряд вспомогательных опытов с целью определения предела длительной несущей способности железобетонных образцов (балок).

В ходе «предварительных» исследований было установлено, что все три балки, загруженные в возрасте 90 суток длительной нагрузкой уров нем $0,98V_{ult}$, разрушились в течение первых двух суток. Балки, загруженные длительной нагрузкой уровнем $0,95V_{ult}$ более, чем в трети случаев разрушились в течение первого месяца с момента окончания кратковременного нагружения. Приуровне $0,925V_{ult}$ – во всех балках наблюдалась относительная стабилизация нарастания деформаций и прогибов. По этой причине, в качестве исследуемых уровней длительного нагружения были выбраны уровни $0,925V_{ult}$; $0,9V_{ult}$; $0,875V_{ult}$. Комплекс экспериментальных исследований состоял из кратковременных и длительных исследований, как железобетонных балок, так и бетонных призм и кубов.

Для определения несущей способности V_{ult}, а также с целью сопоставления результатов кратковременного и длительного нагружения, в каждой из указанных серий опытов одну из балок доводили до разрушения кратковременно действующей нагрузкой. Остальные три балки каждой серии загружали длительно действующей нагрузкой, уровень

которой варьировался в пределах от $0,875V_{ult}$ до $0,925V_{ult}$. Испытание железобетонных балок осуществлялось в соответствии с действующими рекомендациями.

Таблица 1

Факторы, уровни их варьирования и основные параметры принятых образцов-балок

Исследуемые факторы I серии		Уровни варьиров.			Интерв. варьир.	Примеч.
Код	Натуральные значения	«-1»	«0»	«+1»		
X1	Относительный пролет среза, a/h_0	1 (17,5см)	2 (35,0см)	3 (52,5см)	1 (17,5см)	
X2	Класс бетона, С, мПа	С12/15	С20/25	С30/30	10	
X3	Коэффициент поперечного армирования, ρ_w (ВрI)	0,0016 (2Ø3)	0,0029 (2Ø4)	0,0045 (2Ø5)	≈0,00145	$L=9h_0=$ $=157,5$см; $h_0=20,0$см; $b=10,0$см; $s=8,25$см.
X4	Коэффициент продольного рабочего армирования, ρ_{s2} (А500С)	0,0129 (2Ø12)	0,0176 (2Ø14)	0,0230 (2Ø16)	≈0,00505	
X5	Коэффициент продольного армирования сжатой зоны, ρ_{s1}(А500С)	(2 Ø8) 0,0058	(2 Ø10) 0,0090	(2 Ø12) 0,0129	≈0,00355	

При кратковременном испытании нагрузка прикладывалась ступенями с 15-ти минутной выдержкой на каждой ступени до разрушения или до заданного уровня нагружения. После достижения заданного уровня нагружения, нагрузка фиксировалась и с помощью пружинной кассеты и домкрата поддерживалась неизменной практически на протяжении всего эксперимента (400 сут.), в процессе которого фиксировались все необходимые параметры. Балки, не разрушившиеся в процессе запланированных длительных испытаний (более80%) подвергались повторному нагружению (догружению) с целью определения их несущей способности.

Догружение до разрушения опытных образцов-балок, длительное время находившихся под воздействием постоянной нагрузки высокого уровня, показало, что несущая способность наклонных сечений не только не снижается, а наоборот повышается в среднем на 8-25% по сравнению с кратковременным нагружением (в зависимости от соотношения конструктивных факторов).

В процессе испытаний железобетонных балок как при длительном, так и при кратковременном нагружениях фиксировали нагрузку, прикладываемую к образцу, прогибы, деформации отдельных волокон бетона и арматуры. На продольную арматуру перед изготовлением образцов были наклеены тензорезиторы КФ5П1-5-200 с базой 5 мм, которые позволили определять соответствующие деформации.

На рис.1-6 представлены основные экспериментальные параметры напряженно-деформированного состояния опытных образцов 27^{й}–«нулевой» серии.

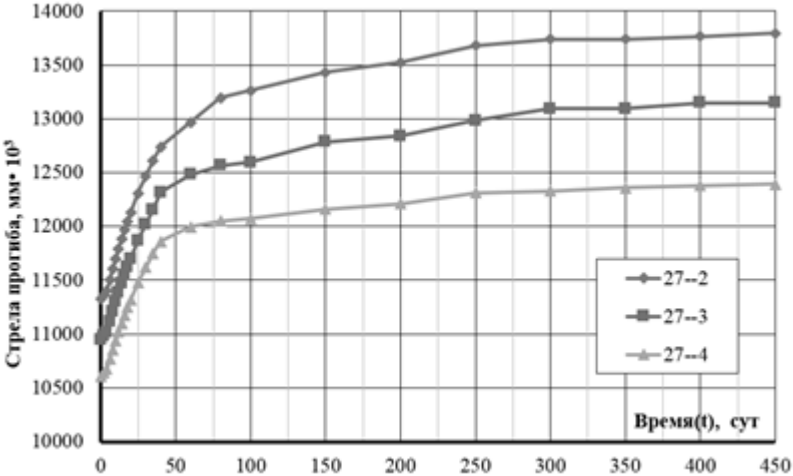

Рис. 1. Прогибы посередине длины балки для серии 0-27 при длительном нагружении

На рис.1 приведено изменение стрелы прогибов для трех исследуемых балок с различным уровнем длительно действующей нагрузки. Из представленных результатов следует, что прогибы за время длительного нагружения выросли на 13-25% по сравнению с аналогичными величинами при кратковременных нагружениях. Естественно, что с увеличением уровня нагрузки более интенсивно растет и стрела прогиба. Более существенное изменение (приращение) стрелы прогиба в про-

цессе длительно действующей нагрузки (до 45%) наблюдается в балках, для изготовления которых использовали бетон низких марок. Пролет среза оказывает влияние на величину прогиба только при его увеличении.Это объясняется изменением механизма работы балки в целом при увеличении пролета среза с $2\boldsymbol{h}_0$ до $3\boldsymbol{h}_0$.

На рис. 2, 3 представлены продольные деформации крайнего сжатого бетонного волокна, соответственно в зоне чистого изгиба и в пролете среза для трех исследуемых балок 27^{й} серии с различным уровнем длительно действующей нагрузки.

Результаты показывают, что за время длительного нагружения вышеуказанные деформации, в зоне чистого изгиба выросли на 40-55%, а в зоне пролета среза – на 70-90%. Столь существенный рост обусловлен процессами ползучести, величина которых зависит от уровня нагрузки. Из конструктивных факторов большее влияние естественно оказывает класс бетона.

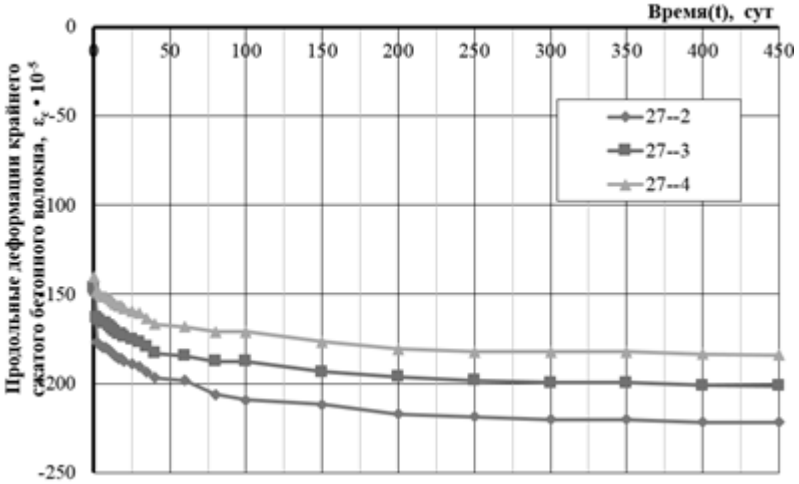

Рис. 2. Продольные деформации крайнего сжатого бетонного волокна в зоне чистого изгиба для серии 0-27 при длительном нагружении

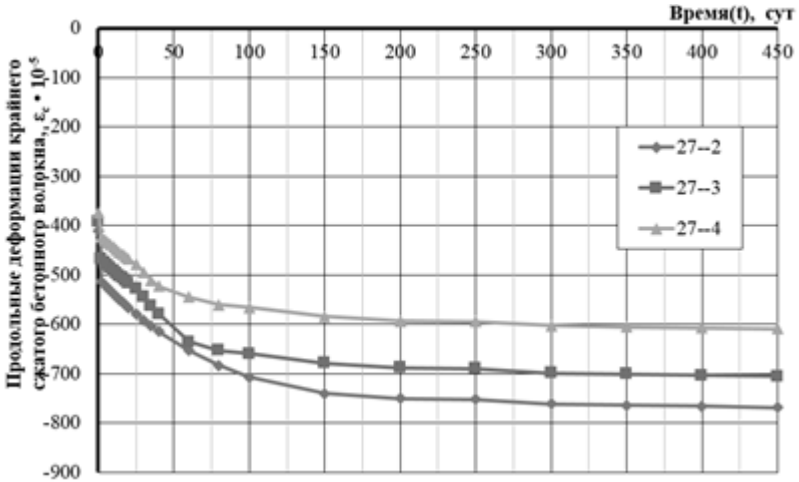

Рис. 3. Продольные деформации крайнего сжатого бетонного волокна в пролете среза для серии 0-27 при длительном нагружении

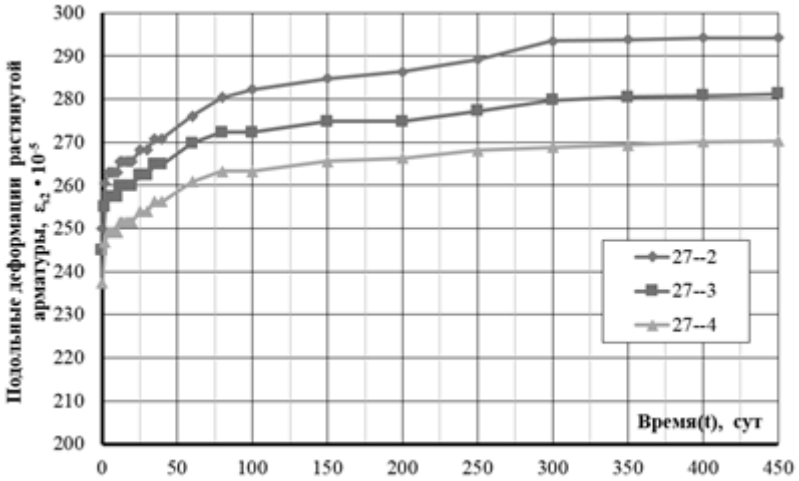

Рис. 4. Продольные деформации крайнего сжатого бетонного волокна в пролете среза для серии 0-27 при длительном нагружении

Продольные деформации растянутой (рабочей) арматуры в зоне чистого изгиба (рис.4) за время длительного нагружения выросли в среднем всего лишь на 15-17%, практически без значимой зависимости от уровня нагружения и конструктивных факторов. Данное обстоятель-

ство объясняется конструкцией опытных балок, в которых зона чистого изгиба заведомо обладает запасом прочности по сравнению с пролетом среза. Продольные деформации рабочей арматуры в пролете среза в зоне действия сосредоточенной силы в процессе длительного нагружения выросли на 15-40% (**рис. 5**). Наиболее значимым фактором, влияющим на величину деформации, был пролет среза, поскольку от пролета среза значимо зависела величина изгибающего момента и кривизна в сечении и, следовательно, продольные деформации.

Нагельные силы в продольной арматуре при длительном нагружении возрастают весьма значительно – на 80-160% (**рис.6**), но в целом их величина даже при столь существенном росте по-прежнему не превышает 10% от общего значения поперечной силы.

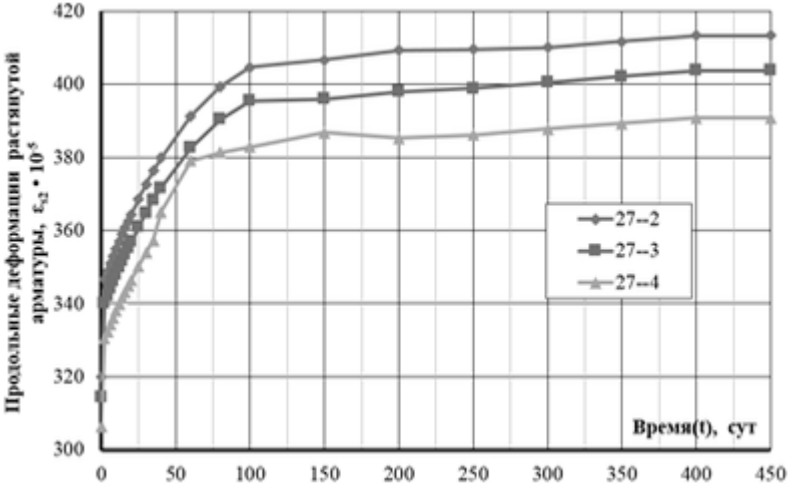

Рис. 5. Продольные деформации растянутой продольной арматуры в пролете среза для серии 0-27 при длительном нагружении

В целом, в большинстве практических расчетов пролетных конструкций с поперечным армированием, влиянием нагельных сил можно пренебречь. Также необходимо отметить, что в сжатой продольной арматуре куда менее выражена тенденция к стабилизации поперечных сил – это можно объяснить значительным перераспределением напряжений в сжатой зоне над магистральной наклонной трещиной на фоне продолжающихся процессов развития и раскрытия наклонных трещин. Влияние уровня нагружения на скорость роста нагельных сил при относительно небольшом шаге величины нагрузки можно считать незначительным. Из конструктивных факторов наибольшее влияние на нее оказывает класс бетона и пролет среза. Причем и в случае большего и в

случае меньшего пролета среза возрастание нагельных сил при длительном нагружении более интенсивно, чем при среднем пролете среза.

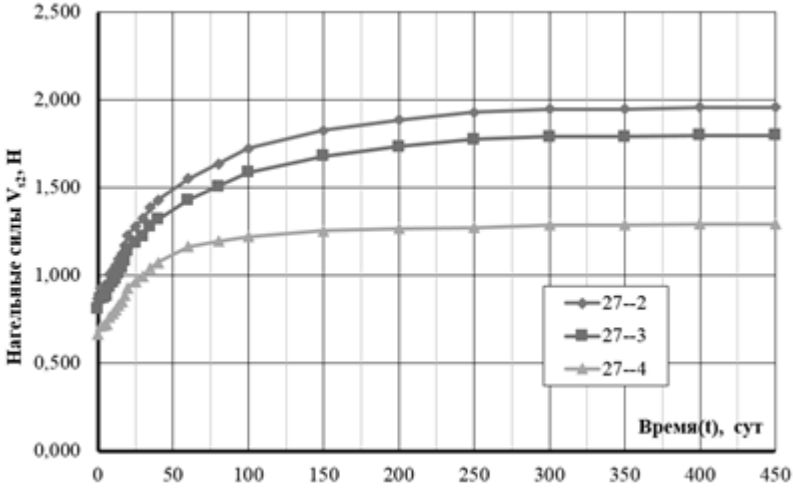

Рис. 6. Нагельные силы в растянутой продольной арматуре в пролете среза для серии 0-27 при длительном нагружении

Выводы

При длительном нагружении с точки зрения влияния для большей части исследуемых факторов картина принципиально не отличается от кратковременного нагружения. Безусловно, происходит перераспределение усилий и рост деформаций, вызванный ползучестью, но изменение параметров во времени относительно их значения к концу кратковременного нагружения, для большей части балок с бетоном класса С20/25 и средним пролетом среза носит весьма сходный характер как в качественном так и в количественном отношении. Более значительная разница получена для балок серии 0-19,0- 20 с другим классом бетона и балок серии 0-18,0-17 с большим и меньшим пролетами среза соответственно. Очевидная разница между балками серий 0-19, 0-20 и «нулевой» обуславливается другим составом бетона и, как следствие – другими параметрами ползучести. В целом, наблюдается давно известная тенденция – чем выше класс бетона – тем меньше, при прочих равных, влияние ползучести на длительное нагружение. На практике это-приводит к меньшему относительному росту деформаций в сжатой зоне бетона и большему – в растянутой арматуре при увеличении клас-

са бетона и наоборот. В случае изменения пролета среза значительно меняется самораспределение напряжений, механизмы деформирования и разрушения. В балках с малым пролетом среза «узким местом» является работа бетона в направлении главных сжимающих напряжений, но в целом наблюдаемые тенденции и их количественные показатели практически равны таковым у балок «нулевой» серии. Для балок с большим пролетом среза, фактически разрушение происходит по зоне чистого изгиба и бетон в зоне разрушения находится в одноосном напряженном состоянии, однозначно можно отметить куда менее интенсивный рост прогиб о виде формаций, чем в балках любой другой серии.

Догружение до разрушения опытных балок, длительное время находившихся под воздействием постоянной нагрузки высокого уровня показало, что несущая способность наклонных сечений не только не снижается в результате длительного нагружения, но и повышается в среднем на 8-25% по сравнению с кратковременным нагружением.

Summary

There described the results of experimental studies of reinforced bending elements support sections under high level steady loading. Analysis of structural factors impact on intense-deformed state, cracking and bearing capacity is provided.

1. Дорофеев В.С. Экспериментальные исследования работы приопорных участков железобетонных балок при длительном воздействии нагрузки / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов //Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 38. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2010. – С. 255-262.

2. Дорофеев В.С. О влиянии конструктивных факторов на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов. / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 39, Частина 1. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2010. - С. 186-199.

3. Дорофеев В.С. Експериментальні дослідження тріщиностійкості приопорних ділянок зігнутих залізобетонних елементів при тривалій дії навантаження / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 34, Частина 1. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2009. - С.19-22.