

ПРОЧНОСТЬ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ВНЕЦЕНТРЕННО РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК.

В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Н.Н. Петров

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина

АННОТАЦИЯ: Приведена часть результатов планированного эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния приопорных участков внецентренно растянутых железобетонных балок. Изучено влияние как в отдельности, так и во взаимодействии друг с другом таких факторов как уровень растягивающей нагрузки (N_p) и относительный эксцентриситет её приложения (e/h_0) на несущую способность наклонных сечений исследуемых элементов. Влияние относительного пролета среза (a/h_0), класса бетона (B), количества поперечного армирования (μ_{sw}), а также двух выше указанных факторов на прочность указанных сечений установлено с помощью численного планированного эксперимента с учетом фактического характера и механизма разрушения исследуемых элементов.

ВВЕДЕНИЕ. История развития науки о железобетоне показала, что первоосновой наших знаний о действительной работе армированных элементов из бетона и стали являются экспериментальные исследования, начало которым было положено во второй половине XIX века в Германии. На рубеже XIX -X столетий А.Ф. Лолейтом [1] во Львове были выполнены исследования прочности железобетонных элементов с учетом стадийности их работы.

Анализ накопленных в 1920...30 г.г. экспериментальных данных позволил создать и развить теоретические модели работы железобетонных конструкций, опубликовать первые учебники [2,3] и отечественный нормативный документ ОСТ 90003-38.

На первом этапе развития теории железобетона в расчете прочности наклонных сечений господствовали, так называемые, методы аналогий (ферменной, арочной, распорной системы, составного стержня и др.), основным недостатком которых является отличие принятых расчетных моделей от реальных условий работы железобетонных конструкций. Тем не менее, метод ферменной аналогии, для развития которого многое сделали Ф.Леонгардт [4] и П.Риган [5], включен в нормативные документы большинства зарубежных стран, в том числе Еврокод -2 [6].

Обширные экспериментально-теоретические исследования, выполненные в послевоенное время, дали возможность сформировать основы комплексной деформационной теории сопротивления железобетона [7], разработать и ввести в 1955 году на территории бывшего СССР новые нормы проектирования, основанные на методе предельных состояний.

А.А. Гвоздевым, М.С. Боришанским и Н.Н. Лессиг [8] в 1946 году был предложен метод расчета наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов, основанный на равновесии предельных усилий в этом сечении. Данная расчетная модель в несколько трансформированном виде была использована во всех последующих, в т.ч. действующем, СНиП [9] и сохранена в новых нормах проектирования железобетонных конструкций в России [10]. Как отмечают А.С.Залесов и Ю.А. Климов [11], этот метод позволил перейти от различных условностей и аналогий к реальной оценке его несущей способности.

Для решения оптимизационных задач при проектировании новых серийных конструкций авторами [11] предложена расчетная модель железобетонного элемента в виде дисково-связевой системы. В работе [12] эту задачу в развитие метода предельного равновесия предлагается решать с учетом неперearмированности железобетонных элементов продольной и поперечной арматурой.

В исследованиях последних десятилетий появился новый подход к построению расчета железобетонных изделий и сооружений, характеризующихся сложными конструктивными формами, напряженно-деформированным состоянием и условиями нагружения, на основе методов конечных разностей, конечных и граничных элементов. Многое в этом направлении сделали В.А. Гришин, А.В.Гришин [13], Н.И. Карпенко [14], С.Ф. Клованич [15], В.П. Митрофанов [16], А.Ф. Яременко [17] и др.

Однако, как указывают авторы [11], наибольшими перспективами с точки зрения простоты и ясности построения, а также совершенствования инженерных методов расчета прочности наклонных сечений железобетонных элементов обладает метод предельного равновесия А.А. Гвоздева и М.С. Боришанского. Это положение закреплено в российском СНиП 52-101-2003 [10] и готовящихся к изданию украинских нормах [18.]

Д.В. Барзилович, Ю.С. Слюсаренко, А.Н. Бамбура [19] в связи с пересмотром нормативной базы считают первоочередными задачами на ближайшее время поэтапное усовершенствование отдельных положений действующих норм проектирования железобетона, которое может стать основанием для разработки нормативного документа нового уровня.

Вместе с тем, авторы российского СНиП 52-101-2003 [10] отмечают, что многочисленные ранее опубликованные и последние предложения по расчету прочности железобетонных элементов при действии поперечных и продольных сил, изгибающих и крутящих моментов еще не достигли такого уровня, чтобы могли быть принятыми в качестве нормативных методов расчета. В работе [12] также указывается на такие недостатки нормативных и других известных методов расчета прочности, как неудовлетворительная сходимости с экспериментами, отсутствие общей модели разрушения наклонных и нормальных сечений, невозможность вывода частных случаев расчета прочности, например, нормального сечения из более общего расчета прочности наклонного сечения, неспособность определять оптимальное армирование железобетонных элементов в зоне действия наибольших поперечных сил, других силовых факторов и пр.

Актуальность работы. Анализ ранее проведенных экспериментальных исследований [1, 2] показал, что совместное действие поперечной силы, изгибающего момента и продольной силы оказывает существенное влияние на характер работы и несущую способность изгибаемого железобетонного элемента. Как оказалось, основными факторами, определяющими влияние продольных сил, является вид силы (сжимающая или растягивающая), ее величина и точка приложения, т.е. наличие эксцентриситета.

Опыты показывают, что действие на элемент продольной растягивающей силы, в значительной степени снижает его несущую способность по наклонным сечениям. Причем, вначале с увеличением продольной силы снижение несущей способности происходит более интенсивно, а затем – падает. Увеличение эксцентриситета приложения растягивающей силы в сторону растянутой грани способствует его постепенному переходу к разрушению по нормальному сечению.

Обзор доступной авторам литературы позволил установить, что исследованиям напряженно-деформированного состояния наклонных сечений железобетонных балок с учетом воздействия продольных растягивающих сил, приложенных с эксцентриситетом, посвящено крайне мало публикаций. И, по-сути, этот вопрос остается недостаточно изученным в теории железобетона, что подтверждает актуальность работы.

Исходя из изложенного в Одесской государственной академии строительства и архитектуры выполняются системные исследования в этой области с целью существенного пополнения банка экспериментальных данных готовящегося к пересмотру соответствующего раздела ДБН Украины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК.

В выполненной I серии опытов с полунатурными образцами- балками исследуемые факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые факторы с учётом воздействия растягивающей нагрузки		Уровни варьирования			Интервал варьирования	Примечания
Код	Натуральные значения	«-1»	«0»	«+1»		
X ₁	Растягивающая нагрузка, N _p , кН (N _p /R _b bh ₀)	22,31 (0,052)	89,25 (0,20)	156,19 (0,348)	66,94 (0,148)	L=9h ₀ = =157,5см; h ₀ =17,5см; a/h ₀ =2; b=10,0см; s=8,75см; B25; μ _s =0,0176 (2Ø14); μ _s ^l =0,0090 (2Ø10); μ _{sw} =0,0029 (2Ø4B _p I).
X ₂	Относительный эксцентриситет N _p , e/h ₀	-0,25 (-4,4см)	0	-0,25 (+4,4см)	0,25 (4,4см)	

Так как исследуемые факторы могут влиять на функцию «выхода» нелинейно и ее целесообразно аппроксимировать полиномом второй степени, то опытные образцы указанной серии (при воздействии растягивающей нагрузки) изготовлены на средних «нулевых» уровнях основной серии по полному двухфакторному плану типа В₂ [21], обеспечивающему одинаковую точность прогнозирования выходного параметра в области, описываемой радиусом, равным 1 (считая от «нулевой» точки).

Экспериментальные исследования I серии показали однозначный характер разрушения опытных образцов по наклонной трещине от преобладающего действия изгибающего момента с достижением предела текучести в нижней растянутой арматуре вначале опасной наклонной трещины, а также в поперечной арматуре по ее длине. Такой характер разрушения позволил смоделировать напряженно-деформированное

состояние и в других образцах II серии, т.е. выполнить численный эксперимент внецентренно растянутых балок по пятифакторному трехуровневому почти Д-оптимальному плану типа На5. Исследуемые во второй серии факторы и уровни их варьирования представлены в табл.2.

Таблица 2

Исследуемые факторы численного эксперимента		Уровни варьирования			Интервал варьирования	Примечания
Код	Натуральные значения	«-1»	«0»	«+1»		$L=9h_0=$ $=157,5\text{см};$ $h_0=17,5\text{см};$ $b=10,0\text{см};$ $s=8,75\text{см};$ $\mu_s=0,0176;$ $(2\text{Ø}14\text{A}500\text{C}) ;$ $\mu_s'=0,009;$ $(2\text{Ø}10\text{A}500\text{C}).$
X ₁	Относительный пролет среза, a/h_0	1	2	3	1	
X ₂	Класс бетона, В, МПа	B15	B25	B35	10	
X ₃	Коэффициент поперечного армирования, μ_{sw}	0,0016 (2 Ø3)	0,0029 (2 Ø4)	0,0044 (2 Ø5)	$\approx 0,0014$	
X ₄	Растягивающая нагрузка, N _p , кН (N _p /R _b bh ₀)	22,31 (0,05)	89,25 (0,20)	156,19 (0,35)	66,94 (0,15)	
X ₅	Относительный эксцентриситет N _p , e/h ₀	-0,25 (-4,4см)	0	+0,25 (+4,4см)	0,25 (4,4см)	

Исследуемые образцы представляют собой свободно опертые однопролетные балки прямоугольного сечения с размером 1975x200x100мм и расчетной длиной пролета $L=9h_0=1575\text{мм}$, где h_0 - рабочая высота сечения, равная 175мм. Балки армированы двумя плоскими сварными каркасами с продольной нижней 2Ø12, 14, 16A500C и верхней 2Ø8, 10, 12 A500C арматурой.

Поперечная арматура на опирных участках состоит из 2Ø3, 4, 5 ВрI, а на остальных участках - 2Ø6A240C. Относительная длина пролета среза (a/h_0) равна 1,2,3. Балки запроектированы так, чтобы обеспечить их разрушение по наклонным сечениям при плоском поперечном изгибе. Для изготовления опытных образцов предусмотрен обычный тяжелый бетон классов B15, B25, B35 на гранитном щебне фракций 5...10мм, кварцевом песке с модулем крупности 1,5, а в качестве вяжущего - обычный портландцемент марки 400 без добавок. Прочность бетона в каждом опыте контролировали с помощью стандартных 6 кубов и 6 бетонных призм.

Для уменьшения водоцементного отношения, улучшения удобоукладываемости бетонной смеси и сокращения сроков набора прочности бетона во всех опытах использовали сертифицированную добавку Релаксол – Супер М в количестве 1% от веса цемента в пересчете на сухое вещество.

Исследуемые образцы-балки во всех опытах нагружали с помощью домкрата ДГ-50 и распределительной балки-траверсы двумя сосредоточенными кратковременными силами ступенями: до появления первых нормальных и наклонных трещин по 0,04...0,06 от суммарной разрушающей нагрузки, затем по 0,08...0,12 - до чрезмерного раскрытия трещин или развития прогибов и, наконец, - по 0,04...0,06 – до разрушения. Выдержка нагрузки на каждой ступени составляла 15 минут со всеми измерениями в начале и в конце каждой ступени нагружения.

Деформации бетона опытных образцов измеряли с помощью проволоочных тензорезисторов с базой 50мм с их контролем индикаторами И1...8 часового типа (рис. 1) с ценой деления $1 \cdot 10^{-3}$ мм.

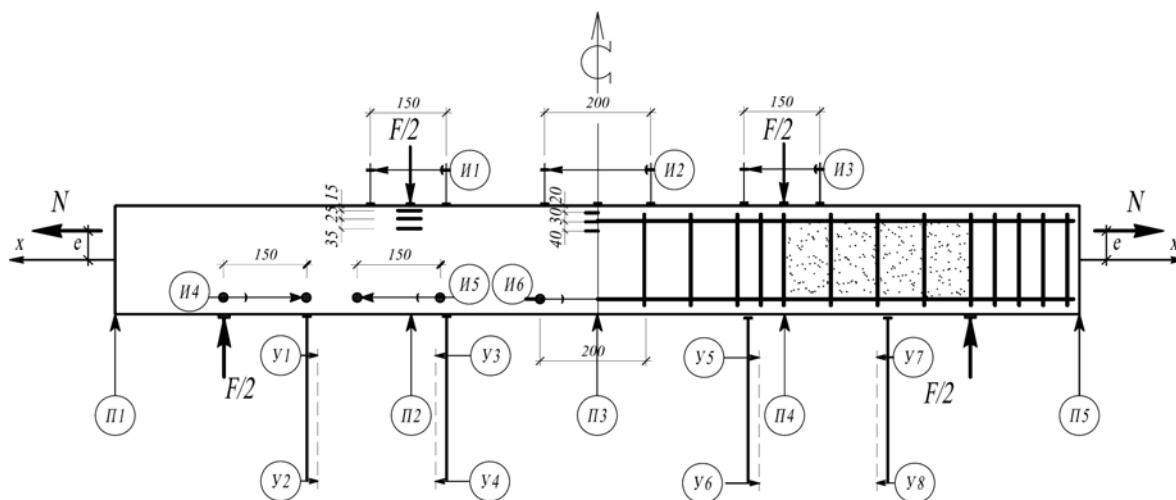


Рис.1. Схема загрузки, расстановки приборов и наклейки тензорезисторов в опытных балках.

По мере появления и развития характерных нормальных и наклонных трещин на каждой ступени нагружения производили фиксирование положения их вершины и измерение ширины раскрытия с помощью переносного микроскопа с 20-ти кратным увеличением.

О количественном и качественном влиянии основных действующих факторов как в отдельности, так и во взаимодействии друг с другом на прочность наклонных сечений можно судить по адекватным математическим моделям, имеющим достаточную информационную полезность:

$$-5,69X_4^2 - 2,82X_5^2 - 1,1X_1X_3 + 9,2X_1X_4 + 7,98X_1X_5 + 6,08X_2X_3, \text{ e } i \quad (v \cong 5,61\%) \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация влияния исследуемых факторов I и II серии представлена, соответственно, на рис 2 и 3.

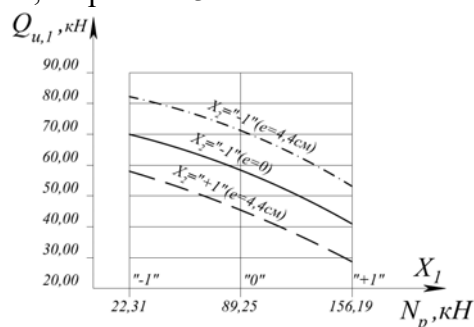


Рис.2. Зависимость прочности наклонных сечений опытных ж/б балок от продольной растягивающей силы и эксцентриситета её приложения.

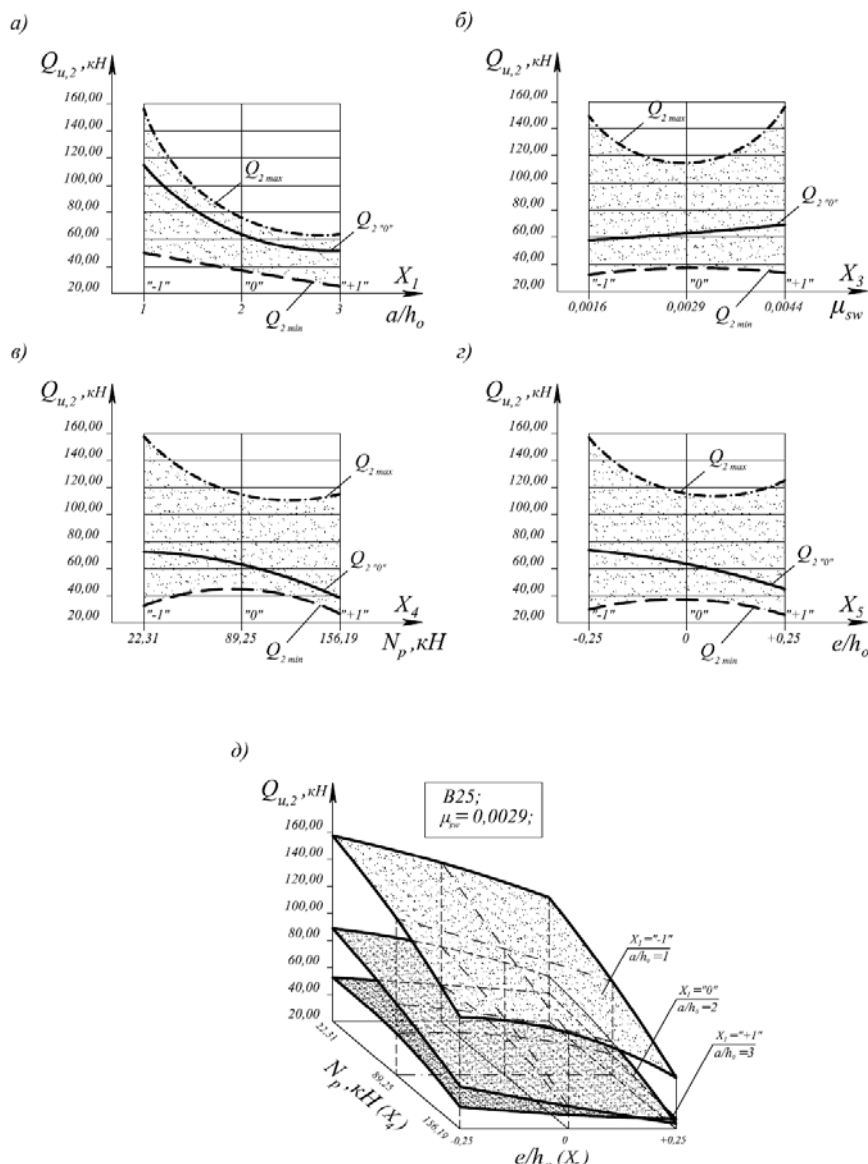


Рис.3. Результаты численного эксперимента по исследованию влияния относительного пролёта среза (а), коэффициента поперечного армирования (б), величины растягивающей продольной силы (в) и эксцентриситета её приложения (г), а также комплексное влияние исследуемых факторов (д) на прочность наклонных сечений внецентренно растянутых железобетонных балок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лопатто А.Э. Артур Фердинандович Лолейт/ Лопатто А.Э. – М.: Стойиздат, 1969. – 104с.
2. Залигер Ф. Железобетон, его расчет и применение/ Залигер Ф. ; – [3-е изд. - пер. с нем. 5-го изд (Вена, 1925)]. – М.: – Л., Госиздат, 1928. – 671с.
3. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона/ Столяров Я.В. – М.: Стойиздат, 1941. – 448с.
4. Leongardt F. Shear and torsion in prestressed concrete. / F. Leongardt / Section an sission VI FIP Kongress. – Prague., 1970. С.13–17.
5. Regan P.E. Shear in Reinforced Concrete Beams./ P.E. Regan // Magazine of Concrete Research, Vol. 22. – 1970. – №73. – С.197–208.
6. Design of Concrete Structures. Part 1; General rules and Rules for Buildings. Eurocod 2. [ENV 1992-1-1]. – European Prestandart, 1992.
7. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона/ Мурашев В.И – М. : Машстройиздат, 1950. – 236с.
8. Боришанский М.С. Расчет отогнутых стержней и хомутов в изгибаемых железобетонных элементах по стадии разрушения/ Боришанский М.С. – М.: Госстройиздат, 1946. – 79с.
9. Бетонные и железобетонные конструкции. СНиП 2.03.01-84*. Госстрой СССР. – М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79с.
10. Звездов А.И. , Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. О новых нормах проектирования железобетонных и бетонных конструкций / Звездов А.И. , Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. // Бетон и железобетон. – 2002. – №2. С. 2–6; – №3. С. 10–13; – №4. С. 16–18.
11. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил/ Залесов А.С., Климов Ю.А. – Киев.: Будівельник, 1989. – 105с.
12. Митрофанов В.П., Арцев С.И., Шабан М. Оптимизационная теория прочности железобетонных элементов и совершенствование метода предельного равновесия для расчета статически неопределимых балок и рам. / Митрофанов В.П., Арцев С.И., Шабан М.// Науч.-практ. пробл. современ. железобетона / Сб. тез. первой всеукр. науч.-техн. конф. – Киев.: НИИСК, 1996. С.154–158.
13. Гришин А.В., Гришин В.А. Расчет упругопластических слоистых стержней при сложном нагружении. / Гришин А.В., Гришин В.А. // Будівельні конструкції/ Зб. наук. праць, вип. 52. –Київ.: НДІБК, 2000. С.71–75.
14. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона/ Карпенко Н.И.– М.: Стройиздат, 1996.– 416с.
15. Клованич С.Ф. Механика железобетона в расчетах конструкций. / Клованич С.Ф.// Будівельні конструкції/ Зб. наук. праць, вип. 52. – Київ.: НДІБК, 2000. – С. 107–115.
16. Митрофанов В.П., Онищенко Д.К., Дергам Али. Разработка механики бетона и железобетона при сложных неоднородных напряженно-деформированных предельных состояниях. / Митрофанов В.П., Онищенко Д.К., Дергам Али // Науч.-практ. пробл. современ. железобетона / Сб. тез. первой всеукр. науч.-техн. конф. – Киев.: НИИСК, 1996. – С. 159–163.
17. Яременко А.Ф., Школа Ю.А. Расчет железобетонных балок прямоугольного поперечного сечения при действии продольной силы, изгиба и кручения. / Яременко А.Ф., Школа Ю.А. // В зб. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип. 3, Рівне, 1999. – С.301–305.
18. Климов Ю.А. О разработке ДБН «Бетонные и железобетонные

конструкции. Нормы проектирования». / Климов Ю.А.// Науч.-практ. пробл. современ. железобетона / Сб. тезисов первой всеукр. науч.-техн. конф. – Киев.: НИИСК, 1996. – С.403–405.

19. Барзилович Д.В., Слюсаренко Ю.С., Бамбура А.М. Тенденції розвитку української нормативної бази проектування залізобетонних конструкцій. / Барзилович Д.В., Слюсаренко Ю.С., Бамбура А.М. // Наук.-техн. пробл. сучасн. залізобетону / Зб. наук. праць, вип. 59, книга 1. – Київ.: НДІБК, 2003. – С. 30–33.

20. Голышев Б.А. , Колчунов В.И., Смоляго Г.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы / Голышев Б.А. , Колчунов В.И., Смоляго Г.А.// Исследование строительных конструкций и сооружений. – М., 1980. – С.26–42.

21. Вознесенский В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ Вознесенский В.А. [– 2-е изд. испр. и доп.] – М.: Финансы и статистика, 1981, –215с.

DURABILITY OF SLOPING SECTIONS OF THE VNETSENTRENNO STRETCHED REINFORCED-CONCRETE BEAMS.