

linear track zoning in the area of permafrost]. *Vestnik TGASU*, Tomsk, Trace 2013 Issue 2, pp.362-370.

3. Bobrova T.V., Dubenkov A.A. Mathematical model of linear road zoning in the permafrost. VESTNIK of Tomsk state University of Architecture and Building / English version appendix to NN 1-4, 2013 / scientific and Technical Journal Tomsk-2013 - 141p, p.134-141.

4. Dubenko A.A. Kompleksnaja ocenka inzhenerno-geologicheskikh i merzlotnykh uslovij pri rajonirovanii trassy dorogi [Comprehensive assessment of engineering, geological and permafrost conditions at track zoning] *Vestnik SibADI*, 2013, no 4 (32) 2013, pp. 46-52.

5. The certificate of state registration number 2014620658 database "Database design solutions subgrade on permafrost grounds«Permafrost Construction Base». A.A. Dubenkov, E.A. Bedrin, T.V. Bobrova. Opubl.08.05.2014, Bul. Computer programs. Database. no 6 (92) in 2014.

6. Guidelines for the evaluation of economic efficiency in the road sector innovation and scientific and technological progress. ODMD / Ministry of Transport, Rosavtodor. Moscow, 2002. 71 p.

7. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 01.11.2007. №157 «On the implementation of resolutions of the Government of the Russian Federation dated August 23, 2007 N 539" On rates of cash costs for the maintenance and repair of federal highways and the rules for their calculation.

8. Grumpy E.A. Funkcional'no-stoimostnoj analiz: sushhnost', teoreticheskie osnovy, opyt primeneniya za rubezhom [Functional and value analysis: nature, theoretical foundations, foreign experience]. Moscow, Informelectro 1980.

9. Dubenko A.A. Variantnoe proektirovanie dorozhnykh konstrukcij s ispol'zovaniem funkcional'no-stoimostnogo analiza [Variant design of road structures using functional-cost analysis]. *Materialy VII Mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf. studentov*,

aspirantov i molodyh uchenykh, 14-16 maja 2013, Volgograd / M of Education and Science Ros.Federatsii, Volgogr. gos. arhit.-stroit.un-T.-Volgograd: Volggasu; 2013, pp 311-315.

10. The survey, design and construction of roads in permafrost: VSN 84-89 / Mintransstroy: Type. 30.03. 1989. Instead VSN 84-75. Moscow, Soyuzdornii, 1990. 271 p.

11. Subgrade on permafrost soils: Patent RU 2256030 C2, E 02 D 17/18 RF / Polenova LA Tugarin AM, Rusakov VS, AV Zakharenko Lonskaya. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/212/2256030/patent-2256030.pdf> (accessed: 03.10.2013).

Боброва Татьяна Викторовна (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: bobrova.tv@gmail.com).

Дубенков Андрей Алексеевич (Россия, г. Омск) – инженер кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: hrnthrnt@gmail.com).

Bobrova Tatiana Viktorovna (Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor of the department "Economics and project management in transport construction", The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: bobrova.tv@gmail.com).

Dubnikov Andrey Alekseevich (Russian Federation) – engineer of the department of "Economics and project management in transport construction", The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: hrnthrnt@gmail.com).

УДК 624.012.45.046

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНКЕРОВКИ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

Ю.В. Краснощёков

ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье приведены результаты компьютерного моделирования опытных образцов, предназначенных для испытаний на выдергивание арматуры периодического профиля из бетона. Анализируется напряженно-деформированное состояние конечных элементов конкретных моделей, определяются участки вероятного образования трещин при упругих деформациях материалов и выявляется характер разрушения бетона по различным теориям прочности. Особое внимание уделено выявлению условий опасного явления раскалывания бетона в зоне анкерования арматуры.

Ключевые слова: железобетон, анкерование арматуры, испытания, моделирование, теории прочности, раскалывание, срез.

Введение

Одной из важнейших задач теории железобетона является взаимодействие арматуры с бетоном в условиях трещинообразования при передаче растягивающих усилий через арматуру. Длительный опыт применения в СССР арматуры периодического профиля кольцевого типа сформировал впечатление об окончательном решении этой задачи, которое было закреплено нормами проектирования железобетонных конструкций в виде расчетных зависимостей длины анкеровки арматуры. Однако появление в 90-х годах на российском рынке арматуры с серповидным профилем напомнило, что процесс познания не имеет конца. Новая для нас арматура имела более слабое сцепление с бетоном, и этот факт потребовал пересмотреть расчетные зависимости с целью обеспечения необходимой надежности конструкций. Изменения в российских нормах в связи с этим вызвали широкую дискуссию по поводу нормирования и надёжности прямой анкеровки [1].

В процессе дискуссии было выявлено, что существуют 2 подхода к модели взаимодействия арматуры периодического профиля и бетона. В отечественных нормах сделан упор на модель, при которой разрушение происходит срезом от нарушения

сцепления арматуры с бетоном. В американских нормах реализована модель разрушения от раскалывания бетона, окружающего арматурный стержень [2]. В действительности разрушение анкеровки может происходить как путем среза контактного слоя, так и в результате раскалывания бетона вследствие развития трещин вдоль арматуры. Цель данного исследования – выявление причин и условий опасного явления раскалывания.

Модели анкеровки и результаты компьютерного моделирования

Модель сцепления была положена в основу технической теории сцепления, разработанной в ВНИИЖелезобетоне с рядом упрощающих допущений [3]. Одно из допущений связано с пренебрежением напряженно-деформированным состоянием бетона в оболочке, окружающей арматуру за пределом контактного слоя. Признавая этот недостаток, авторы теории сцепления допускали возможность устранения его специальными (конструктивными) методами [4]. Эмпирической основой теории были многочисленные результаты экспериментальных исследований, выполненных по упрощенной схеме испытания «на выдёргивание» арматурного стержня из призмы, опёртой торцом (рис. 1).

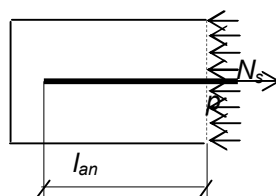


Рис. 1. Схема испытания опытных образцов

Однако испытания по схеме 1 отвечают далеко не самому неблагоприятному случаю анкеровки, так как бетон, окружающий стержень, сжимается реактивным давлением p и улучшает условия анкеровки. Такие опыты дают завышенное сопротивление выдёргиванию из-за стеснения развития трещин раскалывания [3]. По существу, в таких испытаниях разрушение от раскалывания не допускается и поэтому не происходит [5].

Модель раскалывания не связана с какой-либо теорией и подтверждается только опытными данными, выполненными также по схеме «на выдёргивание» арматурного стержня (рис. 2), но отличающейся от

изображенной на рисунке 1. В этих образцах предусмотрен участок с нарушенным (устраненным) сцеплением, который ослабляет влияние реактивных давлений опорной плиты. Сложилось впечатление, что причины и условия раскалывания можно обнаружить при исследовании напряженно-деформированного состояния бетона в опытных образцах. Для этого использован метод компьютерного моделирования. Кстати, направление развития теории с использованием ЭВМ для учета деформаций бетона в оболочке, окружающей арматуру периодического профиля, предусматривал М.М. Холмянский [3].

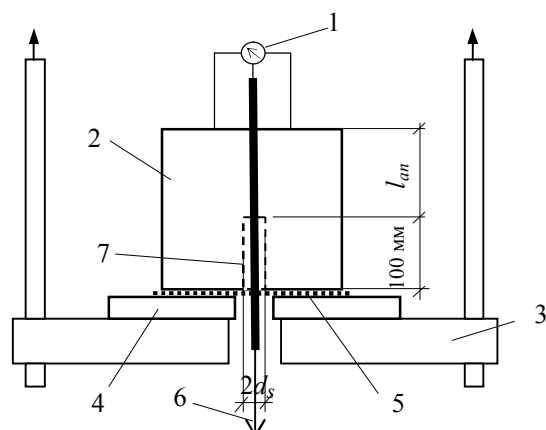


Рис. 2. Схема испытания на выдергивание по рекомендациям РС-6 методике РИЛЕМ/ФИП/ЕКБ [6]: 1 - измеритель деформаций; 2 - испытуемый образец бетона; 3 - опорная плита; 4 - стальная пластина; 5 - резиновая опорная прокладка; 6 - направление усилия выдергивания; 7 - участок с нарушенным сцеплением

При моделировании использованы результаты испытаний на выдергивание арматуры из бетона по схеме 2, приведенные в монографии [7]. Испытания проводили в разных организациях с целью определения прочности и деформативности сцепления арматуры периодического профиля с бетоном. Всего испытали 335 образцов с размерами $200 \times 200 \times 200$ мм при $l_{an} = 100$ мм, а также $250 \times 250 \times 250$ мм и $300 \times 300 \times 300$ мм при $l_{an} > 100$ мм [5]. Длину анкеровки l_{an} изменяли в пределах от $5d_s$ до $15d_s$. В образцах предусматривали зону с нарушенным сцеплением длиной 100 мм.

Выдергивание арматурных стержней из бетона происходило либо при срезе бетона ребрами профиля, либо при раскалывании бетонного образца. Срез наблюдался при малых величинах l_{an} или относительно низкой прочности бетона. При $l_{an} > 8d_s$ и расчетном сопротивлении сжатию $R_b > 17$ МПа разрушение, как правило, происходило при раскалывании бетона.

Цель моделирования – получение данных о напряженно-деформированном состоянии бетона образцов перед разрушением бетона как срезом, так и раскалыванием с приблизительно одинаковой вероятностью. Поэтому для компьютерной модели принят

образец $200 \times 200 \times 200$ мм при $l_{an} = 100$ мм, армированный стержнем $d_s = 12$ мм. Для модели бетона образца применены универсальные пространственные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы КЭ-36 $10 \times 10 \times 10$ мм, для арматуры стержневые элементы КЭ-10 ПК «Лира» длиной 10 мм. При обработке численных результатов приняты характеристики бетона класса В 30: модуль деформации $E_b = 30000$ МПа; сопротивление сжатию $R_b = 17$ МПа; сопротивление растяжению $R_{bt} = 0,08R_b = 1,36$ МПа и сопротивление срезу $R_{bsr} = 0,225R_b = 3,8$ МПа. Значения сопротивлений растяжению и чистому срезу приняты в соответствии с ГОСТ [8].

В результате расчета получили численные значения упругих деформаций арматуры и бетона. Абсолютное удлинение арматурного стержня на участке анкеровки составило 0,111 мм/кН (от 0,143 мм/кН в начале зоны анкеровки и 0,032 мм/кН в конце). Для получения общего представления о компьютерной модели на рисунке 3 показано изополе перемещений в плоскости XOZ.

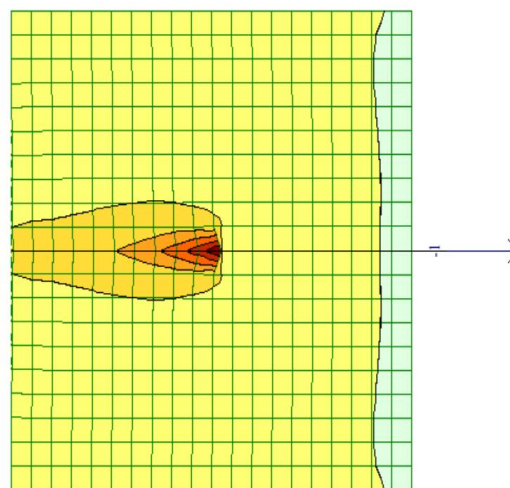


Рис. 3. Изополе перемещений в компьютерной модели опытного образца при выдергивании арматурного стержня усилием $N_s = 10$ кН

Получены данные об изменениях напряжений в арматурном стержне по длине анкеровки $l_{an} = 10$ см (рис. 4).



Рис. 4. Относительные напряжения σ_s / R_s в арматуре по длине анкеровки

В таблице 1 приведены численные значения некоторых параметров напряженно-деформированного состояния модели образца, полученные по различным теориям прочности.

Основное внимание обращено на величину напряжений σ_e в массиве бетона, эквивалентных одноосному растягивающему напряжению. Предполагается, что если во всех элементах продольных сечений образца $\sigma_e \geq R_{bt}$, то образуются сквозные трещины, которые могут привести к разрушению раскалыванием, а при $\sigma_e \geq R_{bsr}$ в элементах, имеющих контакт с арматурой по всей длине

анкеровки, к разрушению срезом. В столбцах 2 и 3 указаны напряжения в арматуре $d_s = 12$ мм за пределами зоны анкеровки, при которых возможно разрушение. В столбцах 4 и 5 приведены размеры участков с трещинами (отметка 0 по длине соответствует координате лицевого торца образца, по глубине – положению арматурного стержня). В столбце 6 приведены максимальные значения сжимающих напряжений в конечных элементах бетона при предполагаемом разрушении образца.

Таблица 1 – Результаты анализа напряженно-деформированного состояния модели образца

Теория прочности	Напряжения в арматуре, МПа		Размеры участка с трещинами, см		Напряжения сжатия в бетоне, МПа
	при расколе	при срезе	длина	глубина	
1	2	3	4	5	6
Наибольших главных напряжений	1580	1121	10 – 20	0 – 4,5	13
Наибольших главных деформаций	1112	500	5 – 20	0 – 5	13
Наибольших касательных напряжений	367	245	0 – 20	0 – 10	0
Энергетическая Губера-Хенки-Мизеса	385	267	0 – 20	0 – 10	0,2
Мора	1388	759	7 – 20	0 – 4,5	2
Друккера-Прагера	2288	-	10 – 19	0 – 3,5	0,4
Писаренко-Лебедева	1051	2996	5 – 19	0 – 4,5	0
Гениева (для железобетона)	-	-	10 – 17	0 – 2,5	10

В результате анализа напряженно-деформированного состояния бетона образца установлено: по теории Друккера-Прагера разрушение опытных образцов, испытанных по схеме 2, может происходить только в результате раскалывания; по теории

Гениева разрушение принятой модели вообще невозможно; только по теории Писаренко-Лебедева разрушение более вероятно в результате раскола, однако из-за больших выдергивающих усилий вероятность разрушения конкретной модели очень мала;

по остальным теориям более вероятным разрушением является срез.

Наиболее предпочтительными для моделируемого образца следует признать теории наибольших касательных напряжений и энергетическую теорию Губера-Хенки-Мизеса. Согласно этим теориям вероятность разрушения раскалыванием составляет примерно 40 %. По этим теориям практически весь объем бетонного образца подвержен образованию трещин, а разрушение от сжимающих напряжений практически исключено.

Полученные результаты, конечно, не отражают напряженно-деформированного состояния элементов реальных конструкций из-за условности испытательных схем. В монографии М.М. Холмянского приведены около десятка различных схем, из которых

схема 1 названа наименее удачной. Очевидно, что в схеме 2 влияние реактивных давлений полностью не устраняется.

Компьютерное моделирование позволяет сравнить различные схемы испытаний и в какой-то степени оценить погрешности каждой из них. В таблице 2 приведены результаты сравнения напряжений арматуры σ_e , достигаемых при разрушении бетона класса В 30 расколом и срезом. Значения σ_e в МПа вычисляли только по теории наибольших касательных напряжений.

Получены данные по схеме 1 с закреплением узлов торцевой поверхности (рассмотрены 2 варианта бетонных образцов призматической и цилиндрической формы) и схеме 3 (также 2 варианта) с закреплением боковых поверхностей образцов.

Таблица 2 – Напряжения в арматуре при разных формах разрушения и схемах испытания

Схема	$l_{an} = 100 \text{ мм}; d_s = 12 \text{ мм}$		$l_{an} = 200 \text{ мм}; d_s = 12 \text{ мм}$		$l_{an} = 200 \text{ мм}; d_s = 20 \text{ мм}$	
	раскол	срез	раскол	срез	раскол	срез
1-призма	1361	297	1286	3708	319	319
1-цилиндр	416	292	408	5928	106	380
2	367	245	-	-	-	-
3-призма	174	191	306	1701	119	203
3-цилиндр	174	186	208	2090	87	201

В натурных условиях испытательную схему 3 реализовать очень сложно, хотя она, по нашему мнению, в наибольшей степени отражает действительную работу элементов при расположении арматуры в массиве бетона. Размеры призматических элементов по схемам 1 и 3 приняты по аналогии со схемой 2 (сечения 200×200 мм), но без участков с устраненным сцеплением. Диаметр цилиндрических образцов 140 мм. Получены данные при длине анкеровки (образцов) 100 мм и 200 мм; в образцах длиной 200 мм рассмотрены 2 варианта диаметров арматуры: 12 мм и 20 мм.

В результате сравнения результатов расчета установлено: при испытании образцов по схеме 3 можно получить наиболее стабильные данные, при этом разрушение расколом для рассмотренных случаев более вероятно; характер разрушения образцов по схеме 2 соответствует данным, получаемым по схеме 3 и цилиндрических образцов по схеме 1; разрушение расколом призматических образцов по схеме 1, как и предполагалось ранее, маловероятно; характер разрушения зависит от размеров и степени армирования образцов.

Вывод

Представляется, что метод компьютерного моделирования образцов, предназначенных для сложных экспериментов, может быть действенным средством прогнозирования характера трещинообразования и разрушения.

Библиографический список

1. Тихонов, И.Н. и др. К дискуссии по статье «О нормировании анкеровки стержневой арматуры» / И.Н. Тихонов и др. // Бетон и железобетон. – 2007. – № 1. – С. 28 – 30.
2. Дегтярёв, В.В. О статье «О нормировании анкеровки стержневой арматуры» / В.В. Дегтярёв // Бетон и железобетон. – 2007. – № 1. – С. 25 – 28.
3. Холмянский, М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с.
4. Тихонов И.Н. и др. О нормировании анкеровки стержневой арматуры // Бетон и железобетон. – 2006. – № 3. – С. 2 – 7.
5. Краснощеков, Ю.В. Влияние трещин на анкеровку арматуры периодического профиля / Ю.В. Краснощеков // Вестник СибАДИ. – 2008. – Вып.3 (9). – С. 39 – 45.
6. RILEM/CEB/FIP. Recommendation on reinforcement steel for reinforced concrete. RC6. Bond Test for reinforcement steel. 2. Pull-out tests. May. 1983. 8 p.

7. Мадатян, С.А. Арматура железобетонных конструкций / С.А. Мадатян. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.

8. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартиформ, 2013. – 30 с.

MODELING OF BAR ANCHORAGE IN CONCRETE

Y.V. Krasnoschekov

Abstract. The article dwells on the results of computer modeling of pilot samples designed to testing for pulling out deformed reinforcement from concrete. The author analyzes the stress-strain state of finite elements of certain models, determines the areas of the probable cracks formation at elastic deformation of materials. The author discovers the character of concrete destruction on the different theories of durability. The particular attention is paid to identifying conditions of dangerous phenomenon of splitting concrete in the area of bar anchorage.

Keywords: reinforced concrete, bar anchorage, testing, modeling, theory of durability, splitting, cut.

References

1. Tihonov I.N. K diskussii po stat'e «O normirovanii ankerovki sterzhnevoj armatury» [The discussion on the article "On the normalization of reinforcement bar anchorage]. *Beton i zhelezobeton*, 2007, no 1. pp. 28 – 30.

2. Degtjarov V.V. O stat'e «O normirovanii ankerovki sterzhnevoj armatury» [On the article "On the normalization of reinforcement bar anchorage]. *Beton i zhelezobeton*, 2007, no 1. pp. 25 – 28.

3. Holmjanskij M.M. *Kontakt armatury s betonom* [Contact of concrete with reinforcement]. Moscow, Strojizdat, 1981. 184 p.

4. Tihonov I.N. O normirovanii ankerovki sterzhnevoj armatury [On the normalization of reinforcement bar anchorage]. *Beton i zhelezobeton*, 2006, no 3. pp. 2 – 7.

5. Krasnoschekov Y.V. Vlijanie treshhin na ankerovku armatury periodicheskogo profilja [Influence of cracks on the deformed bar anchorage]. *Vestnik SibADI*, 2008, no 3 (9). pp. 39 – 45.

6. RILEM/CEB/FIP. Recommendation on reinforcement steel for reinforced concrete. RC6. Bond Test for reinforcement steel. 2. Pull-out tests. May. 1983. 8 p.

7. Madatjan S.A. *Armatura zhelezobetonnykh konstrukcij* [Reinforcement of concrete structures]. Moscow, Voentehlit, 2000. 256 p.

8. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam* [State standart 10180-2012. Concrete. Methods of determination of durability on control samples]. Moscow, Standartinform, 2013. 30 p.

Краснощекоев Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Krasnoschekov Yuriy Vasilevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department «Building structures», The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

УДК 666.97

ВЛИЯНИЕ СОСТАВОВ МАТЕРИАЛОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.С. Лесовик¹, И.Л. Чулкова²

¹ФГБОУ ВПО БГТУ им. В.Г.Шухова, Россия, г. Белгород;

²ФГБОУ ВПО «СибАДИ» Россия, г. Омск.

Аннотация. Проведен анализ влияния структурообразования при твердении цементов. Показана роль состава и свойств цементов на формирование структурных параметров цементного камня, определяющих его эксплуатационные свойства. Установлено влияние капиллярно-пористой структуры на свойства клинкерных минералов и цементов. Разработан алгоритм управления процессами структурообразования при создании интеллектуальных композитов.

Ключевые слова: клинкерные минералы, цементы, структурообразование, химический и минеральный составы, пористость строительных композитов, геоника, техногенный метасоматоз.

Введение

В последние годы строительным композитам, высококачественным бетонам на

основе цементов посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Наряду с постоянным