

Уточнение методики расчёта анкерных болтов в бетонном основании

В.А.Смирнов, НИУ МГСУ, НИИСФ РААСН, Москва

В настоящей работе проводится анализ работы анкерных болтов с отгибом, установленных в бетонном основании. Многочисленными исследованиями и испытаниями выявлено три основных механизма разрушения указанных анкерных болтов при действии осевой растягивающей нагрузки: разрушение по металлу анкерного болта, разрушение, вызванное потерей сцепления между телом анкерного болта и окружающим массивом бетона («проскальзывание» анкера в основании), и разрушение, вызванное откалыванием бетонного конуса, содержащего в себе анкер. При расчётах анкерных болтов следует определить предельные нагрузки для каждого из указанных видов разрушения с учётом диаметра и материала анкера, прочностных характеристик основания и глубины расположения анкерного болта. Актуальность рассматриваемой задачи связана с тем, что в действующем Приложении Г к СП 43.13330.2012 отсутствует методика расчёта несущей способности таких соединений по каждому из указанных механизмов разрушения, а глубина анкеровки назначается в зависимости от диаметра анкерного болта, что в некоторых случаях приводит к существенным запасам (экономически нецелесообразно), либо попросту нереализуемо (например, при установке анкерных болтов в основание малой толщины). Кроме того, в отличие от, например, зарубежных рекомендаций для установки анкеров в готовое основание, в Приложении Г к СП 43.13330.2012 отсутствует методика учёта краевых и межосевых расстояний и её влияния на несущую способность анкерных болтов.

В связи с вышеуказанным в статье предложены методики расчёта анкерных болтов, соответствующие основным механизмам их разрушения при действии осевых растягивающих и сдвигающих нагрузок, а также их комбинаций.

Ключевые слова: анкерные болты, расчёт, проектирование, бетон, крепление.

Clarification of the Method for Calculating of Anchor Bolts in a Concrete Base

V.A.Smimov, MGSU, NIISF RAACS, Moscow

The article analyzes the performance of anchor bolts with a bend installed in a concrete base. Numerous studies and tests have revealed three main failure mechanisms of the anchor bolts under axial tensile loads: failure by the metal of the anchor bolt, failure caused by loss of bond between the anchor bolt body and the surrounding concrete mass ("slippage" of the anchor in the base), and failure caused by spalling of the concrete cone surrounding the anchor from the base. The anchor bolt calculations

have to determine the ultimate loads for each of these failures considering the diameter and material of the anchor, the strength characteristics of the foundation, and the anchorage depth. This problem is topical since the current Appendix D to SP 43.13330.2012 contains no procedure for the calculation of carrying capacity of such connections for each of the mentioned failure modes and the anchorage depth is assigned according to the anchor bolt diameter, which in some cases results in considerable reserves (economically inexpedient) or is simply not realizable (for example, when the anchor bolts are installed into the foundation of a small thickness). Besides, in contrast, for example, to foreign recommendations for anchors installation in a ready-made foundation, there is no technique in Appendix D to SP 43.13330.2012 which takes into consideration the edge and interaxial spacing and its effect on the carrying capacity of the anchor bolts.

In connection with the above-mentioned, the article offers the methods of anchor bolt calculation corresponding to the main mechanisms of their destruction under the action of axial tensile and shear loads as well as their combinations.

Keywords: anchor bolts, calculation, design, concrete, fastening.

Расчёт анкерного болта на действие осевой растягивающей силы

Результаты многочисленных исследований [1–9] показали, что для анкерного болта с отгибом, устанавливаемого в бетонное основание, существует три основных механизма разрушения (предельных состояния), представленных на рисунке 1:

1) разрушение анкерного болта по стали, вызванное истощением несущей способности материала болта;

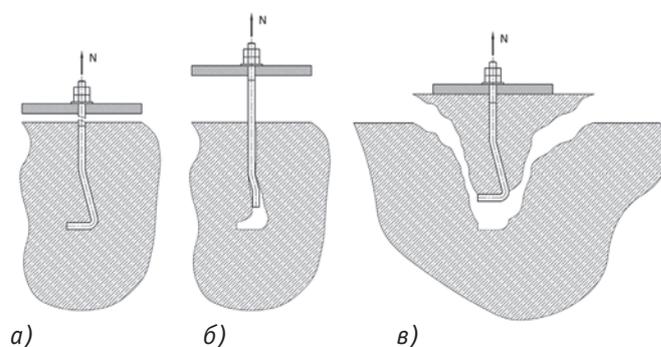


Рис. 1. Механизмы разрушения при осевом растяжении: а) разрушение по телу анкерного болта; б) проскальзывание тела анкерного болта в основании; в) разрушение от откалывания основания

2) проскальзывание тела анкерного болта в основании, сопровождающееся его разгибанием, вызванное потерей сцепления между телом анкерного болта и окружающим массивом бетона;

3) разрушение, вызванное откалыванием бетонного конуса, окружающего анкерный болт, от основания, в результате истощения несущей способности материала основания.

В рамках данного исследования предполагается, что основание выполнено из тяжёлого бетона, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 26633, и в пределах зоны влияния анкерного болта не имеет конструкционной или рабочей арматуры. Наличие армирования в месте установки анкерного болта существенно влияет только на механизм разрушения по рисунку 1 в, поскольку при этом часть растягивающих сил, воспринимаемых бетонным основанием, передаётся на арматуру. Данный эффект, например, рассмотрен в работах [3; 5].

Несущую способность анкерного болта с отгибом определяют равной минимальному значению несущей способности по каждому предельному состоянию (механизму разрушения) с учётом количества установленных анкерных болтов, межосевых и краевых расстояний:

$$N_{ult} = \min \{N_{ult,s}, N_{ult,sl}, N_{ult,c}\} \quad (1)$$

где $N_{ult,s}$ – несущая способность анкерного болта при разрушении по стали, кН; $N_{ult,sl}$ – несущая способность анкерного болта при проскальзывании, кН; $N_{ult,c}$ – несущая способность анкерного болта при откалывании бетона основания, кН.

Типичная кривая «нагрузка – перемещение болта» представлена на рисунке 2 для случая разрушения анкерного болта по стали.

Можно отметить, что кривая деформирования анкерного болта в целом соответствует кривой деформирования стали соответствующей марки. В связи с этим прочность тела одиночного анкерного болта с отгибом определяют как

$$N_{ult,s}^0 = A_s R_s, \quad (2)$$

где A_s – поперечное сечение анкерного болта нетто, см²; R_s – расчётное сопротивление стали растяжению, кН/см².

Характерная кривая «нагрузка – перемещение болта» представлена на рисунке 3 для случая проскальзывания

тела анкерного болта в основании. На начальном этапе кривой деформирования до нагрузки в 10 кН перемещения анкерного болта незначительны, происходит выборка зазоров и выработка начальной затяжки. В диапазоне перемещений 0,5–1,0 мм происходит передача нагрузки на анкерный болт и работа всего соединения до величины нагрузки, при которой происходит истощение боковой поверхностью анкерного болта сцепления с окружающим бетоном. Возрастающие перемещения при практически постоянной нагрузке соответствуют процессу скольжения и распрямления анкерного болта в канале.

Работа анкерного болта в бетоне основана на двух основных механизмах взаимодействия [4; 12–15]: работа сил сцепления поверхности болта с основанием и работа сил трения скольжения между боковой поверхностью болта и основанием. В расчётах принята упрощённая модель сцепления болта с бетоном по [14] с равномерным распределением касательных напряжений по длине участка анкеровки. Нагрузку, воспринимаемую болтом за счёт сил сцепления с основанием, определяют по формуле:

$$N_{bond} = u_s l_{bond} R_{bond}, \quad (3)$$

где u_s – периметр поперечного сечения болта, см; l_{bond} – длина анкеровки болта, см; R_{bond} – расчётное сопротивление сцепления болта с бетоном, принимаемое по формуле, кН/см²:

$$R_{bond} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{bt}, \quad (4)$$

где R_{bt} – расчётное сопротивление бетона осевому растяжению, кН/см²; η_1 – коэффициент, учитывающий влияние вида поверхности арматуры, принимаемый равным: 1,5 – для гладкой арматуры; 2,0 – для холоднодеформируемой арматуры периодического профиля; 2,5 – для горячекатаной и термомеханически обработанной арматуры периодического профиля; η_2 – коэффициент, учитывающий влияние размера диаметра арматуры, принимаемый равным: 1,0 – при диаметре арматуры не более 32 мм; 0,9 – при диаметре арматуры 36 и 40 мм.

В рамках поставленной задачи принимают $\eta_1 = 1,5$, а η_2 определяют в зависимости от диаметра анкерного болта.

Нагрузку, воспринимаемую анкерным болтом за счёт сил трения между болтом и каналом (образованным анкерным болтом) с основанием, определяют по формуле:

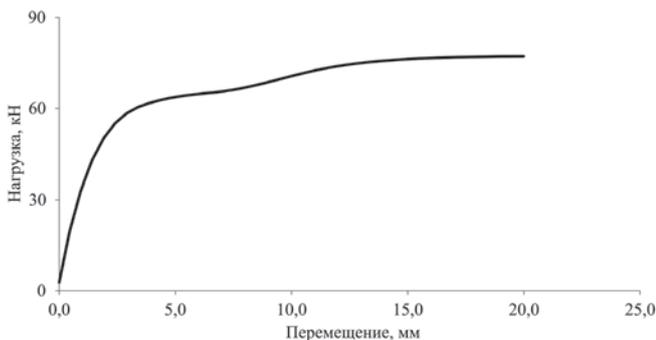


Рис. 2. Диаграмма деформирования анкерного болта с отгибом (разрушение по стали)

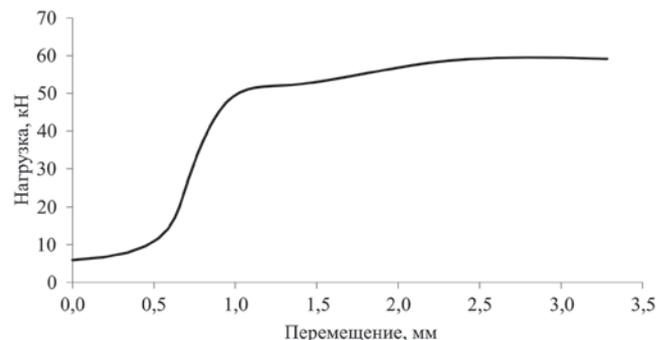


Рис. 3. Диаграмма деформирования анкерного болта при проскальзывании

$$N_{fr} = \mu N_n, \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения скольжения, принимается равным $\mu = 0,45$ [11]; N_n – нормальная проекция сжимающей силы, кН.

На рисунке 4 представлена схема распределения сил трения и сцепления, действующих на различные зоны на поверхности анкерного болта при действии на его свободный конец растягивающей силы N .

Определим величину сил трения и сцепления, действующих на различных участках анкерного болта при его вытягивании из основания по схеме рисунка 4.

Сила сцепления $N_{bond,1}$ на погруженном конце анкерного болта длиной l_2 может быть определена по формуле (3) при замене $l_{bond} = l_2$.

При определении предельной силы трения скольжения учитываем, что величина нормальной проекции силы N_n не может превысить расчётного сопротивления бетона основания сжатию, которое для данного участка анкерного болта, с учётом того, что трение происходит только верхней поверхностью анкерного болта, может быть описано формулой:

$$N_{n,1} = R_b \frac{u_s}{2} l_2, \quad (6)$$

Равнодействующая сил в анкерном болте $N_{arc,1}$ на первом участке по рисунку 4, представлена в виде:

$$N_{arc,1} = (N_{bond,1} + N_{fr,1}) e^{\mu \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right)}, \quad (7)$$

где $N_{fr} = \mu N_{n,1}$, кН; φ – угол наклона, град, участка анкерного болта (см. рис. 5), определяемый по формуле:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{l_3}{l_1 - d - r} \right). \quad (8)$$

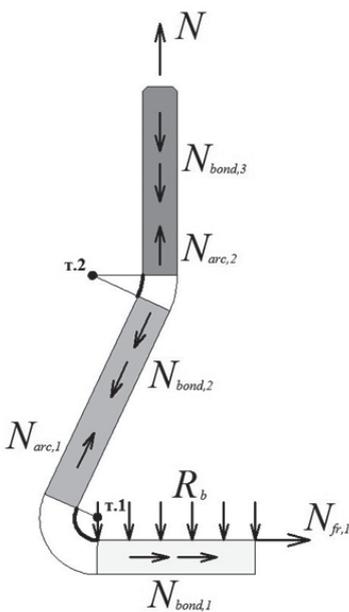


Рис. 4. Схема сил, действующих по поверхности анкерного болта

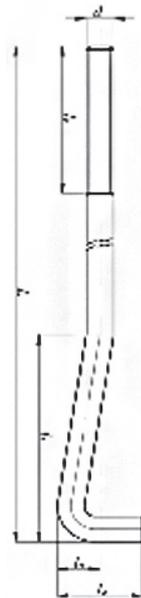


Рис. 5. Геометрические размеры анкерного болта

Силу сцепления анкерного болта с основанием по его наклонной части определяем аналогично формуле (3): $N_{bond,2} = u_s \cdot s \cdot R_{bond}$, учитывая, что длина наклонного участка s равна $s = \sqrt{l_3^2 + (l_1 - d - r)^2}$ (см).

Величина нормальной проекции сжимающей силы (рис. 6) на наклонном участке анкерного болта между т. 1 и т. 2 по рисунку 4 а равна:

$$N_{n,2} = R_b \cdot \sin \varphi. \quad (9)$$

При подстановке (9) в (5) получим выражение для силы трения данного участка анкера в виде:

$$N_{fr,2} = \mu \cdot R_b \cdot \sin \varphi \cdot \frac{u_s}{2} \cdot s, \quad (10)$$

Равнодействующая сил в анкерном болте $N_{arc,2}$ на втором участке по рисунку 4 а представлена в виде:

$$N_{arc,2} = (N_{arc,1} + N_{bond,2} + N_{fr,2}) e^{\mu \varphi}, \quad (11)$$

В верхней части анкерного болта возникает только сила сцепления анкерного болта с основанием, которую определяют по формуле:

$$N_{bond,3} = u_s (l_{ef} - l_1) R_{bond}, \quad (12)$$

Несущая способность одиночного анкерного болта с отгибом при проскальзывании определяется как равнодействующая сил (11) и (12) по формуле:

$$N_{ult,sl}^0 = N_{bond,3} + N_{arc,2}, \quad (13)$$

Потеря несущей способности при откалывании бетона основания происходит при достижении бетоном основания предельного значения на растяжение. Анализ результатов экспериментальных исследований [1; 4; 6; 8; 9; 15] показывает, что вокруг отгиба анкерного болта возникает зона (ядро) объёмного сжатия, которая работает совместно с анкерным болтом при его деформации. При увеличении нагрузки размеры ядра увеличиваются (образуя так называемую призму или конус разрушения), захватывая всё большую часть бетона вблизи анкерного болта, пока не достигают границ основания. В классических исследованиях [1; 2], угол α , образованный

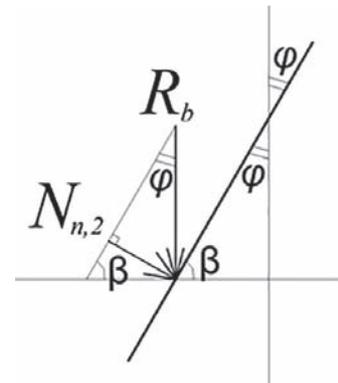


Рис. 6. К определению нормальной проекции сжимающей силы

касательной к внешней границе данного ядра и горизонтальной осью по рисунку 7, принимается равным 43°–45°. В результате многочисленных экспериментов, проведённых в работах [8; 9; 12; 16–18], было установлено, что величина данного угла колеблется от 35° до 37°. На основании анализа экспериментальных данных принята модель призмы разрушения, представленная на рисунке 7. Разрушение по данному механизму происходит за счёт достижения напряжениями в пределах призмы разрушения расчётного сопротивления бетона на растяжение. Предполагаем, что растягивающие напряжения равномерно распределены по поверхности верхней грани призмы разрушения (проекция призмы разрушения на поверхность основания), как показано на рисунке 7. На основании анализа экспериментальных данных, можно принять верхнюю поверхность (проекцию на поверхность основания) призмы разрушения квадратной [12].

Несущая способность анкерного болта при выкалывании бетона основания может быть определена по формуле:

$$N_{ult,c}^0 = A_{cone} \cdot R_{bt}, \quad (14)$$

где A_{cone} – площадь проекции призмы разрушения на поверхность основания, упрощенно определяемая по формуле (12):

$$A_{cone} = 9l_{ef}^2, \text{ см}^2, \quad (15)$$

где R_{bt} – расчётное сопротивление бетона основания растяжению, кН/см².

Также в рамках экспериментальных исследований отмечена возможность реализации при действии растягивающих нагрузок на анкерный болт смешанных механизмов разрушения, в том числе проскальзывания, совмещённого с разрушением по конусу. Для учёта этого факта следует вместо несущей способности анкерного болта при откалывании бетона основания $N_{ult,c}^0$ принимать несущую способность при комбинированном разрушении $N_{ult,comb}^0$, которая определяется весовой суперпозицией указанных двух моделей:

$$N_{ult,comb}^0 = \psi N_{ult,c}^0 + (1-\psi) N_{ult,sl}^0 \quad (16)$$

где ψ – коэффициент участия механизма разрушения, $\psi = 0,45 \dots 0,55$.

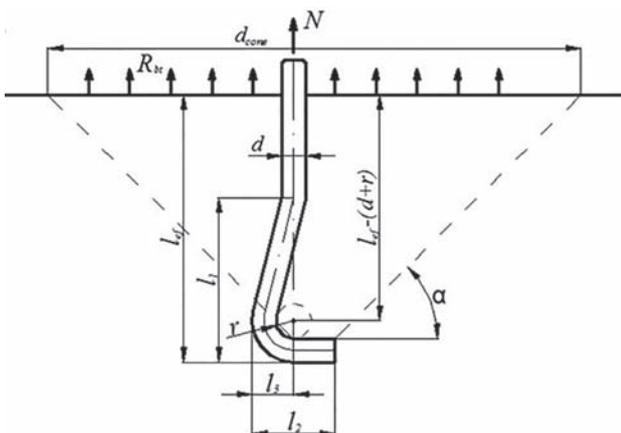


Рис. 7. Призма разрушения анкерного болта с отгибом

Анкерные болты считаются работающими в группе в случае, когда их проекции на поверхность основания пересекаются, как показано на рисунке 8.

За счёт того, что призмы разрушения анкерных болтов в группе пересекаются, несущая способность группы при откалывании бетона основания снижается. Площадь проекции призмы разрушения анкеров в группе суммируется с учётом пересечений, и несущая способность группы определяется с учётом этого значения эффективной площади передачи нагрузки $A_{ef,n}$ вместо A_{cone} .

Обширный анализ экспериментальных исследований работы анкерных болтов при сдвиговых нагрузках проведён в исследованиях [7; 17; 19; 20], использованных в данной работе для определения несущей способности анкерных болтов с отгибом. На рисунке 9 по материалам [19] представлены характерные диаграммы растяжения и среза анкерных болтов при значительном расстоянии до края.

На начальном этапе деформирования анкерного болта при действии сдвигающей нагрузки происходит «выборка зазоров», образованных анкерным болтом и окружающим бетоном и (или) присоединённой распределительной плитой (пяткой), а также работа сил трения между распределительной плитой и поверхностью бетонного образца, вызванного прижатием анкера анкерной плиты. При превышении внешней нагрузкой сил трения покоя распределительная плита начинает перемещаться относительно центра анкерного болта, вызывая его изгиб. За счёт изгиба при последующем увеличении сдвигающей нагрузки в анкерном болте начинают развиваться растягивающие усилия, а перед ним образуется зона смятия, которая (при превышении предельной нагрузки смятия) начинает разрушаться с образованием характерных линзованных трещин. За счёт смятия и разрушения бетона основания перед анкерным болтом происходит увеличение плеча приложения сдвигающей нагрузки и соответствующих

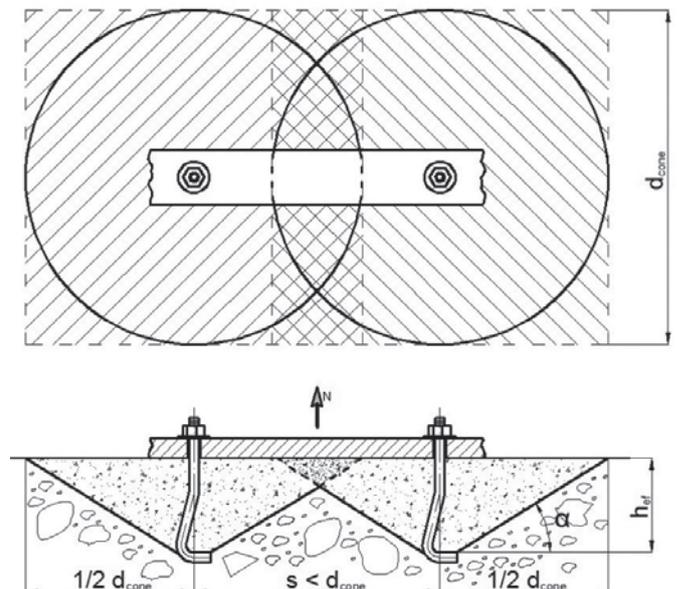


Рис. 8. Групповая установка анкерных болтов с отгибом

изгибных напряжений. При условии значительной глубины анкеровки [19] анкерный болт продолжает воспринимать сдвигающие усилия вплоть до полной потери несущей способности из-за среза по стали. С учётом пластической работы бетона в зоне смятия, а также стали анкерного болта, деформативность такого соединения при сдвигающих нагрузках, как показано на рисунке 10, оказывается больше, чем при простом растяжении.

На основании комплекса испытаний [15; 19], а также с учётом опыта [20; 21] сформулированы основные механизмы разрушения анкерного болта при сдвиге, которые представлены на рисунке 10. К ним относятся: срез по стали анкерного болта (рис. 10 а, б, в, г), отрыв грани основания (рис. 10 д), разрушение бетона за анкером (рис. 10 е), а также вырыв из бетона (рис. 10 ж).

Несущую способность V_{ult}^0 одиночного анкерного болта с отгибом на срез определяют равной минимальному значению исходя из несущей способности анкерного болта при срезу при разрушении по стали $V_{ult,z}$, кН, несущей способности анкерного болта при отколе грани основания $V_{ult,ed}$, кН, несущей способности анкерного болта при разрушении бетона основания за анкером $V_{ult,ed}$, кН.

$$V_{ult} = \min\{V_{ult,s}, V_{ult,ed}, V_{ult,c}\}, \quad (17)$$

Анкерные болты, работающие на сдвиг, разрушаются по стали при установке вдалеке от края и на значительной глубине. Принимается, что толщина анкерной плиты достаточна для предотвращения возникновения смятия отверстия или разрушения плиты. Предельное усилие, воспринимаемое одним болтом на срез, определяется по формуле [1], учитывая один расчётный срез болта:

$$V_{ult,s}^0 = A_s R_s, \quad (18)$$

где A_s – площадь сечения болта нетто, см²; R_s – расчётное сопротивление материала болта срезу, кН/см².

Несущая способность анкерных болтов на срез, расположенных вблизи от грани (торца) основания снижена по срав-

нению с несущей способностью болта по стали. Разрушение в таком случае зачастую происходит за счёт отрыва (скола) грани основания перед анкером, как показано на рисунке 11 [17].

Результаты исследований, приведённые в [22] показывают, что отрыв (скол) грани основания происходит по конусу, схожему с конусом разрушения анкерного болта при растяжении, но расположенном под углом $\beta = 35^\circ$, а в глубину основания отрыв (скол) развивается на величину от 1,3 до 1,5 краевых расстояний, как показано на рисунке 12. Несущая способность анкерных болтов, установленных вблизи края основания, во многом определяется прочностью бетона при растяжении.

При глубине основания, определяемой соотношением: $h_{block} > c$, площадь проекции призмы разрушения на боковую поверхность грани основания определяется формулой:

$$A_{cone} = 4,5c^2, \text{ см}^2 \quad (19)$$

При глубине основания меньшей 1,5с, несущая способность анкерного болта определяется на основании вычисления редуцированной проекции площади на внешнюю грань основания A_{red} , как показано на рисунке 13.

Несущая способность одиночного анкерного болта при отколе грани основания определяется по формуле:

$$V_{ult,ed}^0 = \begin{cases} A_{cone} R_{bt}, & h_{block} \geq 1,5c \\ A_{red} R_{bt}, & h_{block} < 1,5c \end{cases} \quad (20)$$

R_{bt} – расчётное сопротивление бетона растяжению, кН/см².

Исследованию работы анкерных болтов при сдвигающих нагрузках посвящены работы [12; 17–22]. В частности, в

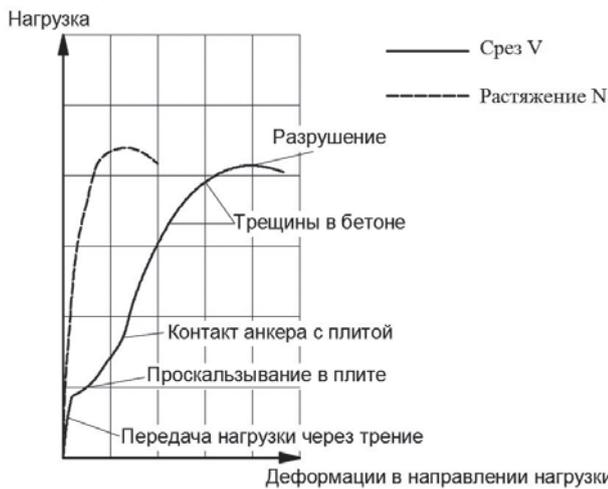


Рис. 9. Характерные диаграммы растяжения и сдвига для анкерных болтов

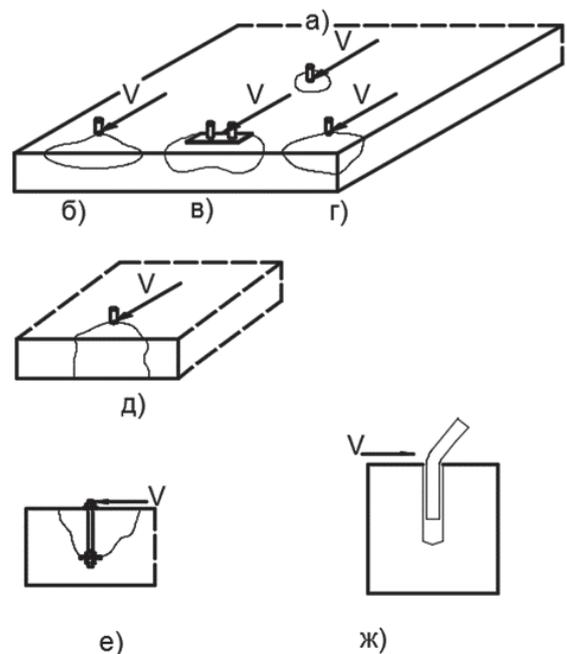


Рис. 10. Механизмы разрушения анкерных болтов: а), б), в), г) срез по стали анкерного болта; д) отрыв грани основания; е) разрушение бетона за анкером; ж) вырыв анкерного болта из бетона

указанных работах впервые выявлено и исследовано влияние глубины анкерки на несущую способность анкерного болта при срезе с разрушением бетона за анкером, установлена эмпирическая зависимость между глубиной анкерки и диаметром анкера $\frac{h_{ef}}{d} < 4,2$, ниже которой происходит преимущественное разрушение бетона за анкерным болтом.

При действии на анкерный болт срезающей нагрузки в бетоне перед анкером образуется зона смятия, в которой бетон крошится, что смещает реакцию бетонного основания V_b глубже. За счёт удлинения тела анкера распределительная плита смещается, происходит её поворот, за счёт чего происходит потеря контакта с поверхностью со стороны внешней силы V . Из-за указанных двух механизмов происходит увеличение эксцентриситета между приложенной силой V и реакцией V_b в бетоне. Момент, вызванный таким эксцен-



Рис. 11. Отрыв грани основания

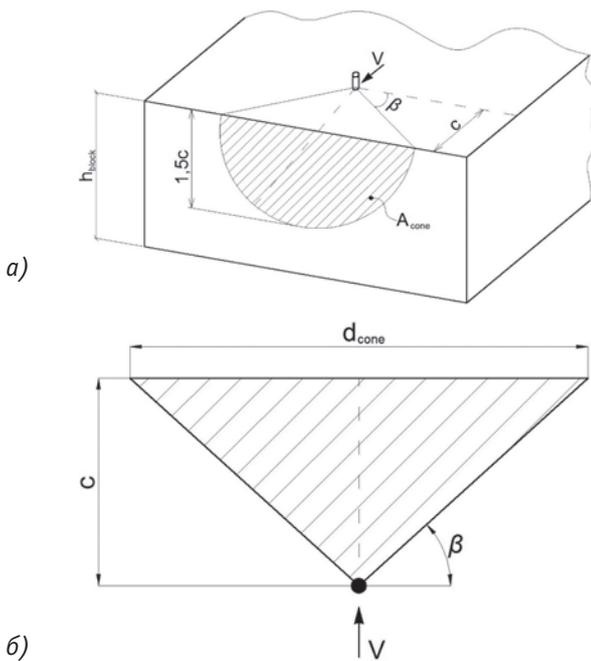


Рис. 12. Модель отрыва грани основания: а) механизм отрыва грани; б) проекция верхней части конуса разрушения

триситетом, вызывает возникновение сжимающей реакции C в бетоне со стороны свободной части анкерной плиты, а также вызывает растяжение N в теле анкера. В случае, если растягивающие усилия в теле анкера превысят величину предельной растягивающей нагрузки разрушения по бетону $N_{ult,c}^0$ для данного типа анкера, в бетоне образуется конус разрушения позади анкера и зона смятия перед ним, как показано на рисунке 14. После исчерпания несущей способности бетона на растяжение (за анкером) и сжатие (перед анкером) происходит разрушение всего соединения.

Величина продольной силы N , возникающая в теле анкерного болта при сдвиге, зависит от многих факторов, включая размеры и толщину анкерной плиты. В частности, исследованиями [5] отмечается, что растягивающая сила N в анкере в момент разрушения по бетону, измеренная с применением тензодатчиков, составляет в среднем 35% от приложенной сдвигающей нагрузки. Исследованиями [17], при которых использовались нелинейные модели в основе конечно-элементной программы, получено, что

$$N \approx 0,4 V$$

На основании данных экспериментальных и численных исследований можно отметить, что размер конуса разрушения при сдвиге составляет примерно 60...70% от размеров конуса разрушения при растяжении (при одинаковой глубине анкерки). С учётом этого можно принять следующую величину предельной нагрузки:

$$V_{ult,c}^0 = \frac{(0,6 + 0,7) \cdot N_{ult,c}^0}{0,35} = (1,7 + 2,0) \cdot N_{ult,c}^0 \quad (21)$$

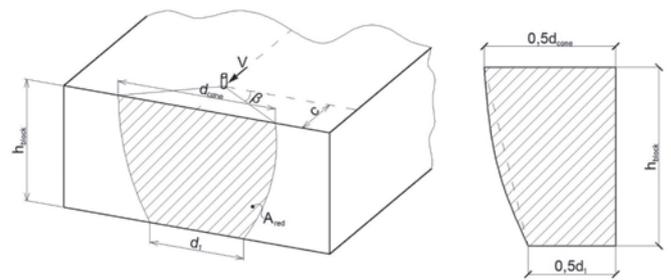


Рис. 13. Определение редуцированной проецированной площади A_{red}

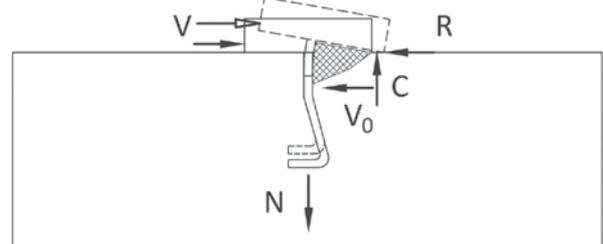


Рис. 14. Механизм разрушения анкера при сдвиге

Литература

1. Астрыб, М.Ю. Исследование напряжённого состояния бетона в зоне заделки болтов с анкерными плитами / М.Ю. Астрыб, А.М. Туголуков // Бетон и железобетон. – 1971. – № 4.
2. Экономичные виды фундаментных болтов / А.М. Туголуков, П.П. Алексеенко, Е.В. Потапкин [и др.] // Бетон и железобетон. – 1972. – № 2.
3. Fabbrocino, G. Experimental behavior of straight and hooked smooth bars in existing R.C. buildings / G. Fabbrocino // Engineering Structures. – August 2005. – № 27 (10). – P. 1575–1585.
4. Jebara. Pryout failure capacity of single headed stud anchors / Jebara, Ozbolt, Hofman // Materials and Structures. – April 2015. – № 49 (5). DOI: 10.1617/s11527-015-0611-9
5. Hawkins, N. Strength in shear and tension of cast-inplace anchor bolts, Anchorage to Concrete, SP-103. – Detroit : American Concrete Institute, 1987. – P. 235–255.
6. Bode, H. Zur Tragfähigkeit von Kopfbolzen bei Zugbeanspruchung / H. Bode, W. Hanenkamp // Bauingenieur, 1985, pp. 361–367.
7. McMakin, P.J. Headed Steel Anchor Under Combined Loading / P.J. McMakin, R.G. Slutter, J.W. Fisher // Engineering Journal, AISC. – Second Quarter. – P. 43–52.
8. Bode, H. Headed Studs – Embedded in Concrete and Loaded in Tension / H. Bode, K. Roik // American Concrete Institute SP 103-4. – Michigan : Farmington Hills, American Concrete Institute, 1987. – P. 61–88.
9. Residual tensile strength of plain concrete under tensile fatigue loading. Meng Xianhong, Song Yupu International Journal of Fatigue. – Vol. 29 – December 2007. – Iss. 1. – P. 2138–2148.
10. Кудишин, Ю.И. Металлические конструкции : Учебник / Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя; под ред. Ю.И. Кудишина. 10-е издание. – М. : Академия, 2007.
11. Cast-in-place Headed Anchor Groups Under Shear: Experimental and Numerical Modelling / T.T. Bui, A. Limam, W.S.A. Nana [et al.] // Structures. – 2018. – Vol. 14. – P. 178–196. ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.008>.
12. Fuchs, W. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, Authors' Closure to Discussions / W. Fuchs, R. Eligehausen, J.E. Breen // ACI Structural Journal. – 1995. – Vol. 92. – № 6. – P. 794–802.
13. Бенин А.В. Новый вариант закона распределения касательных напряжений сцепления арматуры с бетоном / А.В. Бенин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2. – P. 11–19.
14. Холмянский, М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 194 стр.
15. Mylrea T.D. The carrying capacity of semicircular hooks. DOI:10.14359/15385
16. Tepfers R. Tensile fatigue strength of plain concrete / R. Tepfers // Journal Proceedings. – Vol. 76. – Iss. 8. – P. 919–934.
17. Fuchs, W. (1990): Tragverhalten von Befestigungen unter Querlast im ungerissenen Beton. Doctor thesis, Universität Stuttgart, 1990.
18. Henzel, J. Anchors under predominantly static shearload with alternating direction / J. Henzel, J. Stork // Darmstadt Concrete. – 1990. – Vol. 5. – P. 79–86.
19. Usami, S. Experimental study of the strength of headed anchor bolts under alternate shearload and combined shearload. / S. Usami, Y. Abe, Y. Matsuzaki // Proceedings of the Annual Meeting of Kanton Branch of Architectural Institute of Japa. – Tokio, 1980.
20. Ollgaard, J.G. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete / J.G. Ollgaard, R. G. Slutter, J.W. Fisher // AISC Engineering Journal. – April 1971. – Vol. 8. – № 2. – P. 55–64.
21. Zhao, G. Tragverhalten von randfernen Kopfbolzenverankerungen bei Betonbruch. Doctor thesis, Universität Stuttgart, 1993.
22. Anderson Neal S. Pryout Capacity of Cast-In Headed Stud Anchors / Neal S. Anderson, Donald F. Meinheit // PCI Journal, 2005. – Vol. 50, Iss. 2. – P. 90–112. <https://doi.org/10.15554/pci.03012005.90.112>.

References

1. Astryab M.Yu., Tugolukov A.M. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya betona v zone zadelki boltov s ankernymi plitami [Investigation of the stress state of concrete in the area of bolting with anchor plates]. In: *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*, 1971, no. 4.
2. Tugolukov A.M., Alekseenko P.P., Potapkin E.V., Grigor'ev L.A., Temkin L.E. Ekonomichnye vidy fundamentnykh boltov [Economical types of foundation bolts]. In: *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*, 1972, no. 2. (In Russ.)
3. Fabbrocino G. Experimental behavior of straight and hooked smooth bars in existing R.C. buildings. In: *Engineering Structures*, August 2005, no. 27 (10), pp. 1575–1585. (In Engl.)
4. Jebara, Ozbolt, Hofman. Pryout failure capacity of single headed stud anchors. In: *Materials and Structures*, April 2015, no. 49 (5). DOI: 10.1617/s11527-015-0611-9 (In Engl.)
5. Hawkins N. Strength in shear and tension of cast-inplace anchor bolts, Anchorage to Concrete, SP-103. Detroit American Concrete Institute, pp 235–255. (In Engl.)
6. Bode H., Hanenkamp W. Zur Tragfähigkeit von Kopfbolzen bei Zugbeanspruchung [Load-bearing capacity of headed anchors under tensionloads]. *Bauingenieur*, 1985, pp. 361–367.
7. McMakin, P. J., Slutter, R. G. and Fisher, J. W. Headed Steel Anchor Under Combined Loading. In: *Engineering Journal, AISC*, 1973, Second Quarter, pp. 43–52. (In Engl.)
8. Bode H., Roik K. Headed Studs – Embedded in Concrete and Loaded in Tension. *American Concrete Institute SP 103-4*. Michigan, Farmington Hills, American Concrete Institute, 1987, pp. 61–88. (In Engl.)
9. Residual tensile strength of plain concrete under tensile fatigue loading. In: *Meng Xianhong, Song Yupu International Journal of Fatigue Volume*, December 2007, no. 29, Iss. 12, pp. 2138–2148. (In Engl.)

10. Kudishin Yu.I., Belenya E.I. Metallicheskie konstruktzii [Metallic structures], Yu. I. Kudishin (ed.). Moscow, Akademiya Publ., 2007.
11. Bui T.T., Limam A., Nana W.S.A., Arrieta B., Roure T. Cast-in-place Headed Anchor Groups Under Shear: Experimental and Numerical Modelling. In: *Structures*, 2018, Vol. 14, pp. 178–196. (In Engl.) ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.008>.
12. Fuchs W., Eligehausen R., Breen, J. E. (1995/2): Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, Authors' Closure to Discussions. In: *ACI Structural Journal*, 1995, Vol. 92, no. 6, pp. 794–802. (In Engl.)
13. Benin A.V. Novyi variant zakona raspredeleniya kasatel'nykh napryazhenii stsepleniya armatury s betonom [A new version of the law of distribution of tangential stresses of adhesion of reinforcement to concrete]. In: *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Petersburg University of Railways]*, 2006, no. 2, pp. 11–19. (In Russ.)
14. Kholmyanskii M.M. Kontakt armatury s betonom [Reinforcement contact with concrete]. Moscow, Stroizdat Publ., 1981, 194 p. (In Russ.)
15. Mylrea T.D. The carrying capacity of semicircular hooks. DOI:10.14359/15385
16. Tepfers R. Tensile fatigue strength of plain concrete. In: *Journal Proceedings*, Vol. 76. Iss. 8, pp. 919–934. (In Engl.)
17. Fuchs, W. (1990): Tragverhalten von Befestigungen unter Querlast im ungerissenen Beton. Doctor thesis, Universität Stuttgart, 1990. (In Germ.)
18. Henzel J., Stork J. Anchors under predominantly static shearload with alternating direction. In: *Darmstadt Concrete*, 1990, Vol. 5, pp. 79–86. (In Engl.)
19. Usami, S.; Abe, Y.; Matsuzaki, Y. (1980/2): Experimental study of the strength of headed anchor bolts under alternate shearload and combined shearload. In: *Proceedings of the Annual Meeting of Kanton Branch of Architectural Institute of Japan*. Tokio, 1980. (In Engl.)
20. Ollgaard J.G., Slutter R.G., Fisher J.W. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete. In: *AISC Engineering Journal*, April 1971, Vol. 8, no. 2, pp. 55–64. (In Engl.)
21. Zhao, G. Tragverhalten von randfernen Kopfbolzenverankerungen bei Betonbruch. Doctor thesis, Universität Stuttgart, 1993.
22. Neal S. Anderson, Donald F. Meinheit. Pryout Capacity of Cast-In Headed Stud Anchors. In: *PCI Journal*, 2005, Vol. 50, Iss. 2, pp. 90–112. (In Engl.) <https://doi.org/10.15554/pcij.03012005.90.112>.

Смирнов Владимир Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Доцент кафедры строительной и теоретической механики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. НИУ МГСУ); ведущий научный сотрудник ФГБУ «Научно-исследовательский институт Российской академии архитектуры и строительных наук (127283, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: belohvast@list.ru.

Smirnov Vladimir A. (Moscow). Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Building and Theoretical Mechanics at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337. NRU MGSU); Leading Researcher at the Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238. NIISF RAACS). E-mail: belohvast@list.ru.