

опоре; 2) величина прогиба должна быть не менее некоторого граничного значения $a_{lim,exp}$ (в первом приближении можно принять граничное значение прогиба около 10% от эффективного пролета конструктивного элемента). Расчетные зависимости, внесенные в нормы [9, 10] для определения связевых усилий, основанные на предпосылке от реализации мембранных эффектов при $a_{lim} = 0, 1I_{eff}$ являются обоснованными. Такой подход в первом приближении может быть принят при разработке национальных нормативных документов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доннелл Л.Г. Балки, пластины и оболочки: Пер. с англ./Под ред. Э.Н. Григолюка. – М.: Наука, 1982. – 568 с.
2. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 1999. – 55с.
3. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. Москомархитектура. – М.: ГУП НИИАЦ, 2002. – 14с.

4. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения/ Москомархитектура.-М.: ГУП НИИАЦ, 2006. - 60с.
5. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. – Мн.: Типпроект, 2003. - 237с.
6. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town; MSO, 1968 (НИИС, перевод 18736).
7. Swedish Board of Housing, Building and Planning – Boverket, 1994, Handbook on Vibration, Induced Deformations and Accidental Loads.
8. Wooding R.E. «An analytical Study of the Moments in Continuous Slabs Subjected to Concentrated Loads», PhD thesis, University of Illinois, 1963, 151 p-p.
9. UFC-023-03 (Unified Facilities Criteria) – Design of Building to Resist progressive collapse, January, 2005.
10. UFC3-340-01 Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effect, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.
11. UFC 4-010-01 DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, Dep. Of Defense, Washington, DC, 2002.

Материал поступил в редакцию 25.02.09

KARABANUIK S.A. Features of resistance of reinforced Concrete Elements, fixed on supports in accidental design situations.

Design methods directed to protection structures from progressive (disproportional) collapse have been considered in this paper. Some design peculiarities of reinforced concrete elements subject to membrane action have been presented. A description of strategy and results of experimental research of reinforced concrete beam due to detection membrane forces in conditions of deformations restriction have been given.

УДК 624.012

Воскобойников И.С., Бранцевич В.П.

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Введение. Прочность железобетонных конструкций при действии многократно повторяющихся нагрузок является важнейшим показателем их эксплуатационной надёжности. Учитывая расширяющиеся объёмы применения несущих сборно-монолитных конструкций в сооружениях, испытывающих в процессе эксплуатации многократно повторяющиеся нагрузки (мосты, эстакады, подкрановые балки, элементы перекрытия промзданий с вибрационными воздействиями от оборудования, подвижного транспорта и т.п.), появляется необходимость исследования прочностных характеристик контактного шва сборно-монолитных балочных изгибаемых элементов при циклических нагружениях.

1. Прочность контактных швов сборно-монолитных конструкций в соответствии с нормативными документами различных стран. Анализируя нормы по проектированию железобетонных конструкций различных стран, можно отметить тот факт, что большинство из них не даёт чётких указаний по расчёту прочности контакта в условиях циклического воздействия.

В действующих на территории России нормах проектирования железобетонных конструкций (СНиП 2.03.01-84* [1]) расчет контактных швов сборно-монолитных конструкций на статическое нагружение производится по эмпирическим формулам, а расчет выносливости контакта производится как при статическом нагружении путем уменьшения расчетных сопротивлений материалов, что приводит к искажению картины напряженно-деформированного состояния сборно-монолитных элементов при статических и циклических нагружениях и, как следствие, к снижению надежности и экономичности проектных решений.

По заключению Скворцова А.Г. [2], расчёт прочности контакта по методике СНиП при статическом нагружении приводит к погрешно-

стям до 40%, при циклическом нагружении - до 50%.

В американских нормах АСІ 318-08 [3] при статическом нагружении прочность контакта на сдвиг предлагается определять по выражению

$$V_n = A_{vf} \cdot f_y (0,8 \sin \alpha + \cos \alpha) + A_c K_1 \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

Первый член в (1) – это вклад эффекта трения в передачу сдвига контактом (0,8 – коэффициент трения). Второй член выражения – это суммарный вклад эффекта зацепления по берегам трещины (контакта) и нагельного эффекта арматуры.

В немецких DIN 1045 [4] для расчёта прочности контакта при статическом нагружении используется следующее выражение

$$V_{Rd,sy} = a_s \cdot f_{yd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha - \mu \cdot \sigma_{Nd} \cdot b, \quad (2)$$

Вопрос работы контакта при циклических нагружениях в нормах [3, 4] опущен.

В общеевропейских нормах Eurocode 2 [5] к вопросу прочности контакта подошли более детально. При статических нагрузках нормы рекомендуют рассчитывать конструкцию по следующей зависимости

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5v \cdot f_{cd}, \quad (3)$$

где v - коэффициент эффективности, $v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$;

c, μ - коэффициенты, зависящие от шероховатости контакта.

При работе стыка в условиях циклических нагрузок нормы [5] предлагают коэффициент c в выражении (3) умножать на коэффициент, равный 0,5.

Отечественные нормы СНБ 5.03.01-02 [6] для расчёта контакта при статической нагрузке тоже предлагают воспользоваться выражением (3). Но, как ни странно, не распространяют данную зависи-

Воскобойников Игорь Сергеевич, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Бранцевич Владимир Петрович, доцент кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

мость для условий циклического нагружения. В связи с этим, возникает ситуация, когда проектировщик вынужден избегать применения композитных железобетонных конструкций при повторных силовых воздействиях.

2. Прочность и деформативность бетона и железобетона при циклических нагружениях. Одним из первых основополагающие выводы о работе бетона при циклическом сжатии сделал Е.Пробст [7]. На основе собственных испытаний цилиндров и призм в возрасте бетона от 2 месяцев до 3-х лет, им было отмечено следующее:

1. Упругая и остаточные деформации возрастают с увеличением числа циклов нагружений, если напряжения превосходят некоторый установленный предел выносливости;
2. Переменные напряжения ниже предела выносливости упрочняют бетон подобно наклепу металлов;
3. При напряжениях ниже предела выносливости диаграмма деформирования «напряжения – деформация» для бетона становится линейной;
4. Предел выносливости бетона составляет 47-60% от его прочности, полученной при статическом нагружении.

Следует отметить, что данные о деформациях бетона при многократно повторяющихся нагрузках противоречивы. Большинство авторов отмечают ускоренное развитие деформаций виброползучести по сравнению с деформациями ползучести при статическом нагружении.

В работах академика В.М. Бондаренко [8, 9] показано, что виброползучесть проявляется только под влиянием длительных высокочастотных знакопеременных силовых воздействий, действующих в присутствии длительных постоянных (или медленно меняющихся) статических нагрузок. Развитие виброползучести бетона обусловлено как явлением вибрационной тиксотропии гелевой структурной составляющей бетонного композита, так и эффектом динамического ослабления межкристаллических контактов в цементном камне и в пограничных слоях вблизи инертного заполнителя за счет градиентов инерционных сил.

В экспериментальной работе [10] приведены сведения о влиянии частоты приложения нагрузки на развитие неупругих деформаций бетона. Автор пришел к выводу, что при постоянных значениях уровня нагрузки и характеристики цикла с изменением частоты от 3 до 10 Гц деформации виброползучести, полученные при одном и том же количестве циклов, увеличивались при уменьшении частоты. Однако деформации ползучести оказались практически одинаковыми при сравнении с деформациями, полученными за одно и то же время испытаний. На основе этих данных сделан вывод о том, что в данном интервале частот нагружения величина деформаций ползучести, полученных в одном и том же промежутке времени, не зависит от частоты повторения нагрузки.

В исследованиях [11] был отмечен тот факт, что после воздействия на балочный элемент многократно повторяющейся нагрузки диаграммы деформирования $\varepsilon_s = f(M)$, $\varepsilon_c = f(M)$ при последующем кратковременном поэтапном нагружении меняют кривизну в сторону оси деформаций.

Изменение кривизны графических зависимостей ε_c от нагрузки при испытаниях бетонных образцов объясняется структурными изменениями бетона от воздействия переменных нагрузок и разгрузок. В балочных образцах такое наблюдаемое изменение происходит из-за увеличения деформаций в бетоне сжатой зоны сечения, и зависит так же от образования и развития трещин в бетоне, нарушения его связи с арматурой в растянутой зоне.

3. Сопротивляемость контактного шва сборно-монолитной конструкции сдвигу при циклическом нагружении. Недостаточно экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию поведения контактного шва сборно-монолитных конструкций при действии циклических нагрузок.

Нарушение контакта между двумя бетонами при циклическом нагружении может привести к уменьшению несущей способности конструкции и к её разрушению, а также резко изменить динамические характеристики конструкций, что может повлечь за собой появление эффекта резонанса.

Стоит сразу отметить основные предпосылки, используемые большинством исследователей при рассмотрении вопросов сопротивления контактного шва сдвигу:

- несущая способность неармированных контактных швов при сдвиге обеспечивается только за счет сил сцепления;
- несущая способность контактного шва при сдвиге обеспечивается за счет сил зацепления по поверхности сопряжения двух бетонов и нагельной работы поперечной арматуры;
- при определении нагельного эффекта арматуры, пересекающей контактный шов, в качестве расчетной следует рассматривать схему в виде стержня заделанного в бетонном массиве, с сосредоточенной поперечной силой на свободном конце, при этом рассматривается та часть элемента (сборная или монолитная), бетон которой по прочностным характеристикам уступает другой, т.е. проводится сечение по контактному шву и для упрощения расчетной схемы часть элемента с более прочным бетоном отбрасывается;
- нагельный эффект поперечной арматуры обеспечивается за счет работы на изгиб самого арматурного стержня и работы на смятие бетона под арматурой;
- в восприятии поперечного усилия за счет нагельного эффекта арматуры участвует только часть бетонного основания под арматурой, называемая зоной активного деформирования бетона, а работой остальной части, в силу незначительности, можно пренебречь;
- предполагается, что в предельном состоянии бетон в зоне активного деформирования работает неупруго;
- в качестве критерия исчерпания несущей способности контактного шва при сдвиге принимаются 3 случая предельного напряженно-деформированного состояния:

1. Разрушение от достижения напряжениями в арматуре при изгибе предела прочности стали.
2. Разрушение от смятия бетона под арматурой.
3. Одновременное достижение предельных состояний по несущей способности бетоном и арматурой.

Ил.Т. Мирсаяповым [12] проведены экспериментальные и теоретические исследования выносливости контактных швов сборно-монолитных балок. Образцы для испытаний отличались классами бетонов, высотой монолитной части и наличием поперечной арматуры. Параметры нагружения также варьировались для каждой серии образцов. Однако ни в одной серии балок разрушение по контактному шву не наблюдалось.

Сопротивление контакту сдвигу рекомендуется определять в виде суммы сопротивлений за счет сил сцепления, зацепления частиц через трение и сжатие и нагельной работы поперечной арматуры. Также отмечается, что для обеспечения совместной работы двух бетонов при циклическом нагружении напряжения, действующие по контактному шву, не должны превышать предел выносливости, а чтобы судить о трещиностойкости и прочности контакта необходимо знать касательные напряжения по контакту τ_b до образования трещины отрыва, касательное напряжение в поперечной арматуре τ_w и напряжение смятия $\sigma_{b,loc}$ в монолитном бетоне под поперечной арматурой после образования трещины отрыва.

Для определения вышеперечисленных напряжений предложены формулы [12]:

$$\tau_{b,max} = \frac{T_{sh,max}}{b \cdot l_{sh} + \frac{G_w}{G_b} \cdot n \cdot A_{sw}}; \quad (4)$$

$$\tau_{w,max} = \frac{T_{sh,max} - T_{f1} - T_{f2}}{n \cdot A_{sw}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{bloc,max} = \frac{2(T_{sh,max} - T_{f1} - T_{f2})}{n \cdot a_m \cdot d_w}, \quad (6)$$

где T_{f1}, T_{f2} - силы трения по контакту;

$n \cdot A_{sw}$ - количество поперечной арматуры, пересекающей контакт;

G_w, G_b - модули сдвига поперечной арматуры и монолитной части конструкции.

А.В. Харченко [13] проведены обширные экспериментальные исследования прочности и деформативности контакта сборно-монолитных конструкций в условиях циклического нагружения. При проведении испытаний армированных образцов за разрушение принималось дестабилизация нагрузки от нарушения сплошности контакта, резкое увеличение градиента деформаций контактного слоя.

Также были проведены испытания 3 серий сборно-монолитных балок на статическую и циклическую нагрузки. Балки I серии были прямоугольного, II к III серий таврового поперечного сечения. Разрушение по контакту наблюдалось только в III серии балок, у которых контактный шов не был армирован. Прочность контакта предлагается проверять по условию

$$\tau = \frac{Q_{sh}}{b_{sh} l_{sh}} \leq \tau_{sh} \quad (7)$$

где $\tau_{sh} = \tau_{cu} + \tau_{un} + \tau_{mp} + \tau_s$, (8)

b_{sh}, l_{sh} - размеры участка сдвига;

τ_{cu} - сопротивление за счёт сцепления и механического зацепления;

τ_{un} - то же, за счет работы шпонок;

τ_{mp} - то же, за счет трения;

τ_s - то же, за счет работы поперечной арматуры на срез.

Выносливость контакта определяется по аналогичному (8) выражению.

$$\tau_{sh} = K_1 \tau_{cu} + K_2 \tau_{un} + K_3 \tau_{mp} + K_4 \tau_s, \quad (9)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4 - коэффициенты, учитывающие влияние уровня нагружения, коэффициента асимметрии цикла и частоты нагружения.

Выводы. Выполненный анализ экспериментальных и теоретических исследований, проведенных различными авторами, а также нормативных документов различных стран позволяют сформулировать применительно к оценке несущей способности контактного шва при циклических нагружениях следующие основные выводы:

1. Сопротивление стыковых соединений сборно-монолитных конструкций при действии статических нагрузок изучено достаточно детально. Вместе с тем, практически полностью отсутствуют данные об исследовании стыковых соединений при циклических нагружениях.
2. Не существует единого подхода к определению сдвигающих усилий по контакту, несущей способности контактных швов между сборным и монолитным бетонами, а также нет единого критерия предельного состояния.
3. В существующих методах расчета не достаточно полно отражаются действительные напряженно-деформированные состояния контактных швов при сдвиге, как при статическом, так и при циклическом нагружениях. Они, как правило, основаны на использовании эмпирических коэффициентов, учитывающих те или иные особенности железобетона и условий нагружения.
4. Жесткость контактного шва на сдвиг, напряжения, коэффициенты асимметрии цикла в бетоне и арматуре контакта непрерывно изменяются в процессе циклического нагружения вследствие

проявления виброползучести бетона под поперечной арматурой контакта в связанных условиях и уменьшения прочности бетона. Эти процессы нельзя не учесть при определении прочности контакта при циклических нагрузках. Поэтому существующие расчётные зависимости (например в Eurocode 2) будут давать существенную погрешность, т. к. не могут учесть постоянно изменяющееся напряженно-деформированное состояние контакта вводом только одного коэффициента, зависящего от состояния поверхности контакта.

5. Нормы проектирования различных стран при формировании требований по расчёту сборно-монолитных конструкций либо вовсе не уделяют внимания циклическим нагружениям (как это сделано ACI, очевидно, полагая «жёсткий» контакт набетонки со сборным элементом), либо запрещают применение составных конструкций при действии циклических нагружений (например, СНБ 5.03.01). Тем не менее, значительные группы составных конструкций испытывают циклические нагружения и учёт этого эффекта необходим при проектировании.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что задача оценки прочности контактных швов сборно-монолитных конструкций требует более подробного изучения и разработки новых методов расчета, наиболее полно учитывающих напряженно-деформированное состояние контакта при действии статических и циклических нагрузок.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. – М: Стройиздат, 1989. – 79 с.
2. Скворцов А.Г. Сопротивление контактных швов железобетонных конструкций при действии сдвигающих сил. Автор, дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 - М., 2000. - 23 с.
3. ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, January 2008, 471 p.
4. DIN1045-1 DEUTSCHE NORM, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, 148 s.
5. prEN 1992-1 Design of concrete structures, October 2001.
6. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. – Мн., 2003.
7. Байрамуков С. Х. Несущая способность, трещиностойкость и деформативность железобетонных изгибаемых элементов со смешанным армированием при статических и повторных нагружениях: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Москва, 2001. – 50с.
8. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1968. - 323с.
9. Бондаренко В.М. Теория и расчет нелинейного, длительного деформирования железобетонных конструкций. - Дис. ... д-ра техн.наук. - И., 1969. - 397с.
10. Кулыгин Ю.С., Белоборов И.К. Ползучесть бетона при многократно повторяющихся сжимающих нагрузках // Особенности деформации бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций. – М., 1969. – С. 77-97.
11. Тур В.В., Кондратчик А.А. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил: Монография.– Брест: изд. БГТУ, 2000. – 400с.:ил.
12. Мирсаяпов, Ил.Т. Исследование выносливости сборно-монолитных железобетонных изгибаемых элементов: Дис. ... канд. технические науки: 05.23.01. – М., 1988. – 243с.
13. Харченко А.В. Исследование прочности сборно-монолитных изгибаемых конструкций по нормальным сечениям. Автор, дис. ... канд. техн. наук 05.23.01-Киев, 1978. – 19с.

Материал поступил в редакцию 24.02.09

VOSKOBOJNIKOV I.S., BRANTSEVICH V. P. To the question on resistance of compound ferro-concrete designs at cyclic loading

Some scientific principles concerning resistance of joints in composite reinforced-concrete elements under cyclic loadings are observed in this article. Results of various authors on researches of resistance of concrete, precast reinforced-concrete and composite constructions under repeated loading are observed and studied. Data about designing of contact joints in composite constructions in standards of different countries are given. It is noted, that the question is in details studied only for structural behavior in the conditions of static loading. National standard of Belarus do not give directions on designing and calculation of a contact joint at cyclic affectings.