

УДК 624.012.46:539.411

канд. техн. наук Костира Н.О.,
Національний авіаційний університет, м. Київ
канд. техн. наук Малишев О.М.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ВРАХУВАННЯ КОНТАКТНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Наведено аналіз факторів, що впливають на значення контактних деформацій, розглянуті різні види контактів в будівельних конструкціях. Під контактними деформаціями в стиках будівельних конструкцій маються на увазі деформації в бетонному шві, по поверхнях контакту і в граничних областях, які входять в активну зону стику. Зона характеризується неоднорідним напружено-деформованим станом, який змінюється в кожній точці зони і в часі.

Ключові слова: контактні деформації, залізобетонні конструкції.

Постановка проблеми. Теорія розрахунку залізобетонних конструкцій постійно розвивається і уточнюється, змінюються норми проектування. В область її розгляду потрапляють все більш складні і спеціальні проблеми, пов'язані з вирішенням завдань по контакту двох тіл.

Контактні деформації і напруження, найбільш повно досліджені і використовуються для потреб машинобудування, в теорії та практиці проектування залізобетонних конструкцій не знайшли широкого практичного застосування. По-перше, в монолітних залізобетонних конструкціях урахування контактних деформацій ніби не має сенсу, якщо не брати до уваги таку основоположну проблему, як взаємодія бетону з арматурою. По-друге, відсутність чіткого уявлення про напружено-деформований стан ідеального стику створювало ілюзію їх неважливості через малість деформацій реальних стикових з'єднань.

Сучасні тенденції розвитку будівельних конструкцій будівель і споруд спостерігаються у збільшенні розмірів прогонів та в зменшенні кількості монтажних елементів за рахунок їх укрупнення, тобто збільшення маси, при використанні високоміцних матеріалів. Це, в свою чергу, викликає зростання контактних деформацій в окремих перерізах і вузлах, збільшення і концентрацію зусиль в елементах і в опорах. Особливо суттєво збільшення опорних навантажень в мостобудуванні, де від міцності опор залежить міцність усієї споруди.

Широке впровадження в будівництво конструкцій з напруженою арматурою, використання збірного та збірно-монолітного залізобетона, збільшення прогонів та концентрація зусиль у стиках і вузлах вимагають реального урахування контактних деформацій в розрахунках конструкцій.

Торцеві зони елементів балок, ферм, арок з напруженою арматурою сприймають зусилля від натяжних пристроїв і напруженої арматури в момент її відпускання і передають їх на бетон через опорні плити, анкери, колодки, анкерні склянки. По контакту метал - бетон розвиваються контактні деформації, які збільшують втрати попереднього напруження в арматурі. Деформації цього ж типу виникають в бетоні в зоні закріплення анкерних болтів. Так, наприклад, в СНиП 2.03.01-84* [1] із семи факторів, викликаючих втрати попереднього напруження в арматурі при натягуванні її на бетон, три пов'язані з контактними деформаціями. У першу чергу це відноситься до деформацій анкерів, розташованих у натяжних пристроїв (табл. 5, п. 3), змінання бетону під витками спіральної або кільцевої арматури при діаметрі конструкції до 3 м (табл. 5, п. 10), деформацій обтиснення стиків для конструкцій, що збираються з блоків (табл. 5, п 11) [1].

В ДБН В.2.6 – 98:2009 [2] та ДСТУ Б.В.2.6 – 156:20 10[3] не в повному обсязі визначено вплив контактних деформацій при розрахунку попередньо-напружених конструкцій у промисловому та цивільному будівництві.

Велика увага в даний час приділяється реконструкції промислових підприємств, підсиленню несучих залізобетонних конструкцій, що також вимагає, в ряді випадків, урахування контактних деформацій.

Розв'язок інженерних задач, що виникають при проектуванні збірних і збірно-монолітних конструкцій, нерозривно пов'язаний з більш глибоким вивченням напружено-деформованого стану в перерізах конструкцій та їх елементів, що дозволяє достовірно оцінити процеси мікро- і макроруйнувань поверхневих шарів матеріалу під впливом зовнішніх навантажень.

Один з основних факторів, що визначають напружено-деформований стан по сухому контакту двох тіл – характеристика їх поверхні. Контактні деформації виникають при початковому контакті двох поверхонь в окремих точках або зонах, площа і глибина яких змінюються в процесі збільшення навантаження. Зовнішнє навантаження викликає змінання виступів поверхні, руйнування мікронерівностей і заповнення западин продуктами руйнування. Значення контактних деформацій в процесі вантаження постійно змінюються, що створює певні труднощі їх врахування при розрахунку конструкцій.

При місцевому стиску, коли навантажується лише частина поверхні, виникають контактні деформації і відповідні їм напруження, розподіл яких

залежить від співвідношення розмірів навантаженої і ненавантаженої площі і властивостей контактуючих тіл.

Зближення двох тіл, викликане зовнішнім навантаженням, формують контактні деформації, зумовлені характером контактуючих поверхонь. Зі збільшенням зовнішнього навантаження зростає кількість поверхневих виступів, що вступають у контакт, збільшується площа окремих плям контакту, що супроводжується відносним зниженням контактних напружень. Оскільки бетон – непружний матеріал, тривале прикладання навантаження викликає розвиток деформацій в більш навантажених виступаючих частинах поверхні бетону і збільшення площі контакту.

При місцевому стиску контактні деформації включають деформації занурення, обумовлені зближенням поверхонь контакту, та викривлення ненавантаженої частини поверхні, що характеризується деформаціями контактної зони бетону.

Основними факторами, що впливають на контактні деформації бетону і процес їх розвитку є характер поверхні бетону, види навантаження та значення контактних напружень, міцність та щільність структури бетону, форма контакту і його площа, вік бетону в момент прикладання навантаження і тривалість її дії, армування бетону в зоні контактних деформацій, вид контакту.

Ступінь ущільнення бетону визначає кількість пор на контактних площинах конструкцій. Обробка поверхні бетону (наприклад, шліфування) дозволяє знизити значення контактних деформацій на 20 ... 30%.

У разі, коли контактують бетон і закладний металевий виріб, закріплений в опалубці до бетонування, контактні деформації знижуються в порівнянні з сухим контактом бетон - метал в 2 ... 3 рази. Установка закладних виробів силовим зануренням їх в відформований бетон збільшує контактні деформації.

При забезпеченні рівномірного контакту двох поверхонь і розподілу зовнішнього навантаження, деформації мінімальні. При позацентровому навантаженні сухого контакту деформації збільшуються на 15 ... 40%.

При навантаженні з'являються пружні контактні деформації, непружні і деформації руйнування виступаючих частин бетону. Другі і треті незворотні. Якщо навантаження зберігається, то контактні деформації збільшуються в результаті розвинення повзучості бетону в активній зоні контакту.

При малоцикловому навантаженні з частковим або повним розвантаженням в період першого циклу вибирається основна частина незворотних контактних деформацій. Другий і третій цикли викликають невелике збільшення повних деформацій за рахунок незворотних. При наступних циклах деформації повністю зворотні як при контакті пружних тіл. Додаткове збільшення рівня малоциклового навантаження супроводжується появою непружних контактних

деформацій. При навантаженнях рівня $0,8 F_u$ і вище відбувається порушення структури бетону в зоні контакту, що призводить до руйнування.

Міцність та щільність структури бетону впливають на деформації, які визначаються викривленням бетонної поверхні і в меншій мірі - деформаціями занурення при місцевому стиску. При менш щільній структурі бетону більш імовірно на його поверхні більшої кількості великих пор, що сприяють зануренню штампа або зближенню контактуючих поверхонь.

Найбільш щільну структуру має центрифугований бетон, що володіє і мінімальними контактними деформаціями. Структуру центрифугованого бетону сердечника труби умовно ділять на п'ять зон, причому п'ятій зоні, на поверхню якої навивається спіральна арматура, притаманна найвищою щільністю і велика кількість крупного заповнювача на одиницю площі [4].

Найбільш сприятливий з точки зору зниження деформативності плоский контакт двох елементів при центральному прикладанні навантаження, так як його номінальна площа постійна аж до руйнування. Лінійний контакт циліндричного штампу, наприклад при передачі зусилля через круглий стрижень на бетон, в перший період має мінімальну площу, яка зростає при збільшенні навантаження.

Найбільші контактні деформації можуть бути отримані при передачі зусилля на бетон через штамп з кульовою поверхнею, наприклад в сферичному шарнірі. У початковий період навантаження виникає контакт в точці, і напруження теоретично рівні нескінченності. Однак навіть при невеликому зусиллі з'являється площа контакту, що збільшується з ростом навантаження.

При рівності двох площ контакту відбувається їх зближення в результаті заглиблення більш міцного матеріалу в менш міцний. Якщо площа контакту мала, наприклад при місцевому стиску, за рахунок деформацій в зоні контакту і впливу ненавантаженої частини перерізу додатково виникає деформація викривлення поверхні бетону. В залежності від співвідношення навантаженої і ненавантаженої площі, коефіцієнт концентрації напружень $k_{loc} = A_{loc} / A$, змінюється і обрис викривлення поверхні. У цьому випадку повна контактна деформація Δ_{tot} , дорівнює сумі деформацій занурення Δ_{dep} і викривлення Δ_{dist} .

Якщо один з контактуючих елементів має модуль пружності на порядок вище, як, наприклад, метал по відношенню до бетону, більш міцний матеріал заглиблюється в менш міцний. При однакових модулях пружності, наприклад при контакті бетон - бетон, відбувається взаємне упровадження виступаючих частин і їх дроблення. Деформації по контакту в цьому випадку підвищуються приблизно в 2 рази в порівнянні з контактом бетон - метал.

Початкові контактні деформації, визначені в момент завантаження, збільшуються в часі в результаті повзучості в 1,5.....2,5 рази в залежності від

рівня навантаження, що прикладається та інших факторів. Відзначено згасання тривалих контактних деформацій приблизно через 3 місяці після прикладення навантаження [5].

Із збільшенням віку бетону зростає його міцність, а контактні деформації, особливо деформації викривлення поверхні, зменшуються. Під впливом зовнішнього середовища із збільшенням віку бетону можливо розпушення (деструкція) поверхневого шару. Тоді слід очікувати збільшення контактних деформацій за рахунок зростання деформацій заглиблення або зближення контактуючих поверхонь.

Як показали досліди [6], армування не впливає на деформації заглиблення штампа в бетон або на зближення бетонних поверхонь, так як ці деформації мають невелику глибину (приблизно до 10 ... 20 мм) і залежать від характеру поверхні. Істотно впливає сітчасте армування торців конструкцій в контактній зоні на деформації викривлення поверхні, зменшуючи поперечні деформації. Якщо контактна зона збігається із зоною поздовжнього армування, то поздовжні деформації в торцевій частині елемента зменшуються.

Вид контакту визначається конструктивними особливостями рішення стиків у будинках і спорудах. Поширені стики з металевими оголовками, з'єднаними зварюванням при монтажі і омонолічені стики зі зварюванням арматури. У стиках першого типу зусилля передається по контакту метал - метал на оголовки, які потім зварюють між собою, в стиках другого типу випуски арматури зварюють ванною зваркою і бетонують зону з'єднання, створюючи контакт бетон - контактний шар - бетон.

У стиках з металевими оголовками забезпечується надійна передача зусиль, полегшене стикування елементів в зимовий час, можливе застосування напівавтоматичного зварювання. Головним недоліком є велика витрата прокатного металу - до 70 кг на стик, необхідний захист від корозії. У стиках зі зварюванням арматури додаткову витрату металу визначають кількістю сіток непрямого армування і витратою електродів.

Застосовують і інші типи стиків, наприклад на болтах, клеєві, з напруженою арматурою. В окремих випадках використовують шарнірні стики зі сферичними поверхнями з контактом бетон- бетон.

Зазвичай стики колон і стики ригелів з колонами виконують роздільно. При висоті збірних колон, що дорівнює двом-трьом поверхам, це рішення традиційно, однак застосовують і суміщені стики колон між собою і з ригелями, в тому числі і в двох напрямках.

Вибір раціонального типу стиків визначається численними факторами, що враховують міцність, технологічність виготовлення та монтажу, витрату металу,

захист від корозії, довговічність, допустиму податливість стиків за рахунок контактних деформацій.

У багатоповерхових будинках при невеликих навантаженнях для стиків ригелів з колонами використовують короткі приховані консолі. Стики цього типу в залежності від конструктивної схеми каркаса можуть бути шарнірними або жорсткими при зварюванні закладних виробів.

При будівництві житлових та громадських будівель застосовують безконсольні стики колон і ригелів, в яких зусилля зрізу передаються на бетонні шпонки. У вертикальних швах виникають контактні деформації зсуву. Момент у грані колон сприймає арматура, що з'єднується ванною зваркою, і бетон замонолічування в зоні стиску. У промисловому будівництві широко поширені стики з відкритими залізобетонними консолями. При шарнірному рішенні вузлів закладні деталі консолі і опорної частини ригеля зварюють.

В каркасах з рамними жорсткими вузлами з'єднують ванною зваркою випуски робочої арматури з ригеля і колони. Зазор між гранню колони, торцем ригеля і зоною зварювання замонолічують бетоном, створюючи контакт бетон - контактний шар - бетон. У цьому випадку контактним шаром є бетон замонолічування.

Досліджуються стики ригелів з колонами з напруженою надпорною арматурою, яка забезпечує спільну роботу елементів, підвищує тріщиностійкість і знижує деформативність вузлових зон. Під опорними плитами напруженої арматури виникають зони контактних деформацій.

У мостобудуванні великопрогонні конструкції (наприклад, балки мостів) збирають з окремих блоків, які стягуються напруженою арматурою. Якщо стики перед натягуванням арматури омонолічують, то в кожному з них виникає контакт бетон - контактний шар - бетон, якщо використовують сухі - контакт бетон-бетон. Контактні деформації в стиках між блоками викликають додаткові втрати попереднього напруження і тим самим знижують тріщиностійкість конструкцій. Можливе застосування клейових стиків, що утворюють контакт бетон - клейовий шар - бетон.

Контакт бетон - жорсткий штамп. У реальних конструкціях жорстким штампом служать металеві пластини або круглі стрижні, вигином яких можна знехтувати. Цей вид контакту характерний для стиків збірних залізобетонних конструкцій. Прикладом може служити стик колон з металевою центруючою прокладкою (рис. 1, а). При монтажі верхню колону спирають на центруючу прокладку, створюючи дві площини контакту бетон - метал. Виникають початкові контактні деформації при місцевому стиску. Подальше рихтування колони викликає позацентрову передачу зусиль через центруючу прокладку і збільшення контактних деформацій.

Ванне зварювання робочої арматури призводить до її нагрівання, а охолодження - до появи розтягувальних зусиль, які збільшують стиск центруючої пластини і контактні деформації. У жорсткому стику ригеля, що з'єднується з колоною високоміцними тяжами (рис. 1, б), виникають контакти по контуру опори ригеля і під шайбами тяжів.

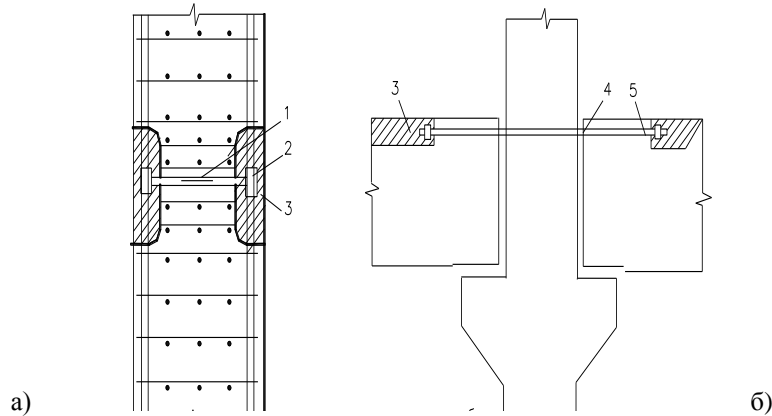


Рис. 1. Стики збірних залізобетонних елементів каркасів: а) – колони з металевою центруючою прокладкою; б) – колони з ригелем 1 – центруюча прокладка; 2 – ванне зварювання; 3 – бетон омонолічування; 4 – закладна деталь; 5 – з'єднувальні тяжі

Подібний вид контактних деформацій виникає при спіранні металевих конструкцій на залізобетонні, в зоні торцевих анкерів напруженої арматури, в сталезалізобетонних балках при використанні металевих шпонок-упорів, при навивці напружуваної спіральної або кільцевої арматури на бетон.

Контакт бетон-контактний шар-бетон притаманний для збірно-монолітних конструкцій, наприклад жорстких стиків каркасних будинків (рис. 2). У виробничих будівлях з великими навантаженнями на перекриття ригелі спирають на консолі, з'єднуючи їх зварюванням. Робочу арматуру стикують ванною зваркою, стик бетонують (рис. 2, а). Між торцем ригеля і колоною утворюється контакт бетон - контактний шар - бетон. Роль контактного шару виконує бетон замонолічування.

У житлових і громадських будівлях передбачають стик з прихованою консоллю і підрізуванням ригеля, який створює більш сприятливий інтер'єр (рис. 2, б). У стиснутій зоні стику виникають контакти бетон - метал і метал - метал. Для будинків у сейсмічних районах використовують замонолічений стик ригеля з колоною зі шпонками і прихованої консоллю (рис, 2, в). Верхню арматуру з'єднують ванною зваркою. Зусилля зрізу сприймається шпонками, які також працюють і на зминання. У стиснутій зоні стику спостерігається контакт бетон - контактний шар - бетон.

У вузлах з напруженою арматурою в колоні і ригелях передбачають канали. Після зварювання закладних виробів на консолях арматуру напружують, а верхню частину стику бетонують (рис. 2, г). При цьому виникають контакти бетон - метал під опорними шайбами арматури і бетон - контактний шар - бетон в зоні бетонування.

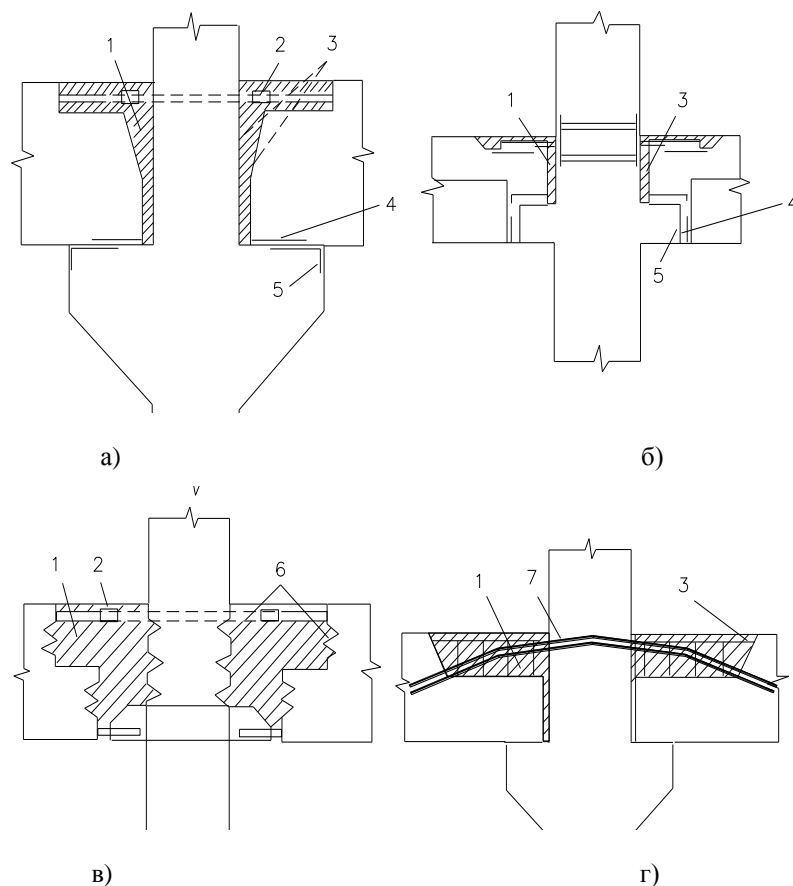


Рис. 2. Стики ригелів з колонами: а) – жорсткий; б) – з прихованими консолями; в) – консольний з шпонками; г) – з напружуваною арматурою; 1 – бетон замонолічування; 2 – ванне зварювання; 3...5 – контакти відповідно: бетон-контактний шар-бетон; метал-метал; метал-бетон; 6 – шпоночний шов; 7 – напружена опорна арматура

Жорсткість контакту істотно залежить від якості ущільнення бетону замонолічування і початкового напруженого стану стику. Якщо бетон замонолічування твердне під навантаженням, наприклад в стиках колон від ваги верхньої колони, утворюється більш жорсткий контакт. У горизонтальних стиках напруження в бетоні омонолічування в період його твердіння, як правило, відсутні, по площинах контакту утворюються усадочні тріщини, і деформативність контакту підвищується.

Таким чином, врахування контактних деформацій у розрахунках попередньо-напружених конструкцій має практичний інтерес і потребує нових наукових досліджень.

Література:

1. Бетонные и железобетонные конструкции. Строительные нормы и правила : СНиП 2.03.01-84*. –М.: ЦИТП Госстрой, 1985 – 79с.
2. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Норми проектування : ДБН В.2.6–98:2009. –К.: Мінбуд України, 2011 – 71 с.
3. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б В.2.6–156:2010. –К.: Мінбуд України, 2011 – 118 с.
4. Зарудна Л.В., Лорретова Р.А. Структура і фазовий склад центрифугованого бетону // Буд. матеріали і конструкції. – 1975. – №1. – С. 8-10.
5. Малышев А.Н., Русинов И.А. Экспериментальные исследования деформаций бетона при длительном местном сжатии // Механика : РЖ/ВИНИТИ. – Сер. 2. – Вып. 1. – 1976. – 48с.
6. Малышев А.Н., Носевич В.М. Исследования распределения контактных деформаций под плоскими и криволинейными штампами // Стр-во и архитектура : РЖ/ВИНИТИ. – Сер. 2. – Вып. 1. – 1984. – 47с.

Аннотація.

Приведен анализ факторов, которые влияют на значение контактных деформаций, рассмотрены разные виды контактов в строительных конструкциях. Под контактными деформациями в стыках строительных конструкций имеются в виду деформации в бетонном шве, по поверхностям контакта и в приграничных областях, которые входят в активную зону стыка. Зона характеризуется неоднородным напряженно-деформированным состоянием, которое изменяется в каждой точке зоны и во времени.

Abstract.

The analysis of factors which influence on the value of contact deformations is offered, the different types of contacts are considered in build constructions. Contact deformations in the joints of build constructions are the deformations in concrete joints, on the surfaces of contact and in boundary areas which are included in the active zone of joint. A zone is characterized by non-uniform stress-strain state which changes in every point of area and in time.