

На правах рукопису

КЛІМОВ Юлія Анатолійович

ТЕОРІЯ І РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ, ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ
І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ
ДІЇ ПОПЕРЕЧНИХ СИЛ

Спеціальність 05.23.01 - Будівельні конструкції,
будівлі та споруди

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1992

07B 26.242

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Практично всі залізобетонні конструкції, які застосовуються в різних галузях сучасного будівництва, в тій чи іншій мірі працюють на сприйняття поперечних сил. Для переважної більшості із них розрахунок міцності, тріщиностійкості і деформативності при дії поперечних сил є визначальним при призначенні розмірів перерізу, інтенсивності і засобів поперечного армування. Разом з тим, незважаючи на значимість і велику кількість проведених експериментально-теоретичних досліджень, проблема сприйняття залізобетонними елементами поперечних сил до теперішнього часу залишається невирішеною. Сучасні методи розрахунку, включаючи і методи, що використовуються в діючих нормативних документах, нормах розвинутих закордонних країн і Європейського комітету по бетону, є вельми недосконалими, не відображають реального напружено-деформованого стану елементів, не ураховують, або ураховують досить наближено вплив цілого ряду факторів, що в остаточному підсумку призводить до суттєвої розбіжності між розрахунком і досвідом. Становище, що склалося, пояснюється рядом причин: складністю самої проблеми, яка об'єднує в собі ряд невирішених до теперішнього часу загальних питань теорії залізобетону; неоднозначністю роботи на сприйняття поперечних сил різних елементів, істотною різницею їх напружено-деформованого стану, характеру тріщиноутворення і руйнування; різноманітністю факторів, що впливають на міцність, тріщиностійкість і деформативність елементів; відсутністю загальної теорії опору залізобетонних елементів дії поперечних сил і, як наслідок, загальної концепції побудови і взаємозв'язку між розрахунками міцності, тріщиностійкості і деформативності.

Внаслідок невирішеності проблеми в сучасній проєктній практиці використовуються досить наближені методи розрахунку, що в умовах масового застосування залізобетону, постійного розширювання номенклатури конструкцій, різноманітності їх форм і матеріалів (бетона і арматури), призводить в одних випадках до перевитрат матеріалів і ускладненню армування, а інших - недостатньої надійності конструкцій.

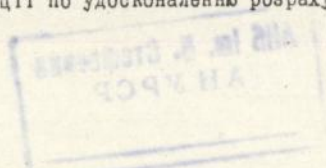
Сукупність вищевикладеного визначає актуальність теми роботи і дозволяє класифікувати опір залізобетонних елементів дії поперечних сил, як велику наукову проблему, яка має важливе народно-господарське значення.

АНБ Ін. Б. Стефенія
АН УРСР

Мета роботи – розробити теорію опору, методи розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності залізобетонних елементів при дії поперечних сил і розповсюдити їх на широку інженерну практику розрахунків.

Автор захищає:

- результати узагальненого аналізу проведених до теперішнього часу експериментальних досліджень і виявлені закономірності опору залізобетонних елементів дії поперечних сил;
- класифікацію залізобетонних елементів, що працюють на сприйняття поперечних сил і стадій їх напружено-деформованого стану;
- основні положення і єдину концепцію побудови розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності;
- фізичні і розрахункові моделі елементів для основних форм руйнування елементів в зоні дії поперечних сил;
- розроблені методи розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності елементів при дії поперечних сил;
- розроблений варіант теорії граничного напруженого стану залізобетону;
- результати експериментальних досліджень і виявлені закономірності в характері тріциноутворення, напружено-деформованого стану і деформування елементів, що руйнуються внаслідок зрізу бетону стислої зони;
- результати експериментальних досліджень і виявлені закономірності в характері тріциноутворення і руйнування, напружено-деформованого стану, тріщиностійкості, деформативності і міцності елементів при небагаторазово повторному навантаженні поперечними силами;
- результати експериментальних досліджень міцності і тріциностійкості елементів змінної висоти при дії поперечних сил;
- результати експериментально-теоретичних досліджень по оцінці внутрішніх зусиль в елементі при дії поперечних сил – зусилля в бетоні стислої зони над критичною похилою тріщиною, нагельного зусилля у поздовжній арматурі, сил зачеплення;
- інженерні методи розрахунку, що виключали до себе розрахунки таврових і двотаврових елементів, попередньо напружених елементів, елементів змінної висоти, розрахунок при різних умовах і режимах навантаження;
- рекомендації по удосконаленню розрахунку міцності елементів



при дії поперечних сил за нормами Європейського комітету по бетону.

Наукову новизну роботи складають:

- класифікація залізобетонних елементів, стадій їх напружено-деформованого стану і розроблена єдина концепція побудови розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності елементів при дії поперечних сил;

- фізичні і розрахункові моделі для основних форм руйнування елементів у вигляді дисково-в'язевих систем при руйнуванні внаслідок роздроблення і зрізу бетону над критичною похилою тріщиною, стержневої системи з піддатливими в'язями при руйнуванні по смузі між опорою та вантажем;

- розрахункові залежності по визначенню внутрішніх зусиль в похилому перерізі елемента - зусилля в бетоні стислої зони над критичною похилою тріщиною, нагельного зусилля у поздовжній арматурі, сил зачеплення;

- методи розрахунку міцності елементів при можливих формах їх руйнування в зоні дії поперечних сил;

- методи розрахунку тріщиностійкості (утворення і розкриття тріщин) елементів при дії поперечних сил;

- метод розрахунку елементів по деформаціям при дії поперечних сил;

- комплекс експериментальних даних про напружено-деформований стан елементів, які руйнуються внаслідок зрізу бетону стислої зони над критичною похилою тріщиною, закономірності деформування елементів в зоні дії поперечних сил, напружено-деформований стан, міцність, тріщиностійкість і деформативність елементів при багаторазово повторному навантаженні поперечними силами;

- розроблений варіант теорії граничного напруженого стану залізобетону і її розповсюдження на розрахунки міцності елементів при дії поперечних сил і елементів із скісним армуванням;

- розв'язання задачі про граничний стан арматурного стержня, який розташований у бетонному масиві, при поздовжньо-поперечному згині і її розповсюдження на розрахунок анкерних стержнів закладних деталей;

- інженерні методи розрахунку елементів при дії поперечних сил;

- модернізована розрахункова модель методу ферменої аналогії.

і відповідні рекомендації по удосконаленню розрахунку за нормами Європейського комітету по бетону.

Практичне значення роботи полягає в доведенні її результатів до рівня упровадження в нормативні документи і практику проектування залізобетонних конструкцій, які широко використовуються у різних галузях сучасного будівництва. Застосування розроблених методів розрахунку дозволило підвищити розрахункову несучу здатність і тріщиностійкість конструкцій, в значній мірі скоротивши при цьому витрати арматурної сталі, а в ряді випадків підвищити надійність конструкцій, що проектувалися.

Результати роботи і розроблені методи розрахунку були впроваджені в науково-дослідному академічному інституті "Інтерпроект" при проектуванні опор і прогінних будов комплексу мостових споруд в м. Севастополі; в корпорації "Укראгропромбуд" при розробці типової серії залізобетонних рам (шифр І.800-РКУ) для виробничих будівель сільськогосподарського призначення, що дозволило скоротити витрати арматури і бетону у порівнянні з існуючими аналогами і здобути економічний ефект більш ніж 7,0 млн. карбованців; в корпорації "Укראгропромбуд", концерні "Укрдорбуд", виробничому об'єднанні "Харківзалізобетон" при перепроєктуванні з метою зниження металоемкості типових залізобетонних конструкцій масового застосування (прогонів, балок, плит); розробці проєктів відбудови будівельних об'єктів, які були пошкоджені при землетрусі у Вірменії в 1988 році.

Розроблені в роботі методи розрахунку елементів при дії поперечних сил прийняті для включення в нові редакції нормативних документів Росії, України і передані до Європейського комітету по бетону.

Апробація роботи. Основні результати роботи були висвітлені в доповідях на координаційних нарадах Секції теорії залізобетону Науково-координаційної Ради по бетону і залізобетону в м. Клайпеді, Бресті, Ростові-на-Дону, Львові (1983-1989 рр.), УІ Національному конгресі по теоретичній і прикладній механіці в м. Варна (1989 р.), об'єднаній сесії національних комітетів ФІП і ЄКБ (1991 р.), республіканських науково-технічних конференціях в м. Львові (1989 р.); Полтаві (1989 р.), науково-практичних конференціях Київського інженерно-будівельного інституту.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 25 робіт, вклю-

чаючи монографію "Прочність железобетонных конструкций при действии поперечных сил" (співавтор О.С.Залесов), статті в наукових журналах, збірках, працях конференції і нарад.

Обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів, закінчення і додатка, викладене на 508 сторінках, з яких 342 сторінки тексту, 129 рисунків і список літератури із 430 найменувань.

Окремі експериментальні дослідження, результати яких приведені в роботі, виконані автором спільно з к.т.н. Р.Д.Аллабердієвим і Кул Прасад Марахатта.

Дисертація виконана на кафедрі залізобетонних і кам'яних конструкцій Київського інженерно-будівельного інституту в 1982-1992 роках при консультації д.т.н., проф. О.С.Залесова.

З М І С Т Р О Б О Т И

Структура побудови роботи відповідає логічній послідовності проведення досліджень. Перший розділ присвячений сучасному стану проблеми опору елементів дії поперечних сил, узагальненню, аналізу і систематизації результатів експериментальних досліджень, що проводилися, виявленню сучасних тенденцій у розвитку теорії, достойнств і недоліків існуючих методів розрахунку. В другому розділі розроблені теоретичні основи опору, єдина концепція і основоположні принципи побудови розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності. В наступних третьому, четвертому і п'ятому розділах розглянуті міцність, тріщиностійкість (утворення і розкриття тріщини) і деформативність елементів при дії поперечних сил і на основі загальних положень теорії розроблені відповідні методи розрахунку. Шостий розділ присвячений розробці інженерних методів розрахунку і їх застосуванню в широкій практиці при проектуванні елементів різних конструктивних форм, умовах і режимах навантаження.

Перший розділ. Проблема опору елементів дії поперечних сил займає особливе місце в теорії залізобетону. Набув, ні по одному з питань теорії не проведено такої кількості досліджень, не існує такого широкого спектру пропозицій по розрахунку і не відчувається такої загальної незадоволеності сучасним станом розвитку.

Проблемі опору дії поперечних сил, яка об'єднує в собі питання міцності, тріщиностійкості і деформативності, присвячені дослідження В.М.Байкова, Т.І.Баранової, В.М.Баташева, І.К.Білоброва, М.С.Борішанського, О.П.Васильєва, П.І.Васильєва, Г.М.Власова, О.О.Гвоздева, О.Б.Голішева, В.Н.Гусакова, Л.О.Дорошкєвича, Л.М.Зайцева, О.С.Залєсова, О.Ф.Ільїна, М.І.Карпенка, О.П.Кирилов, Ф.Є.Клименка, А.П.Кудзїса, Р.Л.Маїляна, А.Ф.Мілованова, В.П.Мітрофанова, В.Б.Ніколаєва, В.А.Отсмаа, О.Б.Пірадова, Г.І.Попова, О.А.Рочняка, Е.С.Стгалова, Б.С.Соколова, І.О.Тітова, І.М.Чупака, Е.Бенєта, Г.Кані, В.Крефєльда, Ф.Леонгардта, Л.Манойлова, П.Рігана, Х.Тейлора та інш.

В рамках аналізу проведених експериментальних досліджень узагальнені і систематизовані численні дослідні дані по широкому колу питань опору елементів дії поперечних сил. Дана розгорнута картина характеру і закономірності процесів утворення, розвитку і розкриття тріщин в залежності від конструкції елемента, умов навантаження та інших факторів. Описані можливі форми руйнування елементів в зоні дії поперечних сил – по стислій зоні внаслідок роздроблення бетону над критичною похилою тріщиною, зрізу бетону над критичною похилою тріщиною, роздроблення бетону у смузі між опорою та вантажем чи між похилими тріщинами і по розтягнутій зоні внаслідок досягання граничного стану чи втрати зчеплення позовжньої арматури з бетоном на опорній ділянці елемента. Дана узагальнена характеристика напружено-деформованого стану, його особливості в різних елементах і закономірності зміни в процесі навантаження. В рамках аналізу напружено-деформованого стану виділені найбільш значні зусилля, діючи у похилому перерізі, дана якісна і кількісна оцінка їх впливу на сприйняття елементом поперечних сил. Узагальнені і систематизовані численні дослідні дані про вплив різних факторів (конструктивних і зовнішньої дії) на міцність, тріщиностійкість і деформативність елементів.

Сучасний етап розвитку теоретичних досліджень в галузі опору елементів дії поперечних сил характеризується широким спектром пропозицій щодо розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності, закріплених в діючих нормативних документах, нормах закордонних країн і приведених у працях ряду дослідників.

В теоретичних дослідженнях присвячених міцності переважають три основних напрямки побудови розрахунку. Перший базується на різних аналогіях - ферменій, вичній, рамній, складового стержня та інших (роботи Б.Бреслера, Г.Кані, Ф.Леонгардта, Є.Хогнестада та інш.); другий - застосуванні для розрахунку методу кінцевих елементів з урахуванням властивостей залізобетону (роботи О.С.Гордецького, В.С.Здоренка, М.І.Карпенка, В.В.Николаєва, А.И.Козачевського та інш.) і деформаційної теорії залізобетону з тріщинами М.І.Карпенка; третій, в рамках якого проведені найбільш численні дослідження, базується на методі граничної рівноваги (роботи В.М.Байкова, Т.І.Баранової, В.М.Баташева, І.К.Білоброва, М.С.Борішанського, О.П.Васильєва, П.І.Васильєва, Г.М.Власова, О.О.Гвоздева, О.Б.Голошева, В.Н.Гусакова, О.С.Залесова, О.Ф.Ільїна, О.П.Кирилова, Ф.Є.Клименка, Р.Л.Маїляна, А.Ф.Мілованова, В.П.Мітрофанова, Г.І.Попова, Б.С.Соколова, П.Рігана, Х.Тейлора та інш.). Кожен з напрямів має свої достоїнства і недоліки, як з точки зору сучасного стану, так і перспектив подальшого розвитку. Методи аналогії базуються на досить спрощених розрахункових моделях, не ураховують реального напружено-деформованого стану, лише наближено оцінюють внутрішні зусилля і вплив на несучу здатність елементів найбільш значних факторів. Доцільність побудови розрахунку на основі методу кінцевих елементів і методу граничного стану в першу чергу визначається класом задач, що вирішуються. Метод кінцевих елементів доцільно застосовувати і розвивати для класу задач, які характеризують складні конструктивні форми елементів, напружено-деформований стан і умови навантаження. Для широкого класу інженерних задач, на які орієнтовані всі діючі нормативні документи, найбільші перспективи має метод граничної рівноваги, здатний забезпечити необхідну точність розрахунку, який фізичний зміст, наочність і можливість контролю розрахунку на різних стадіях його виконання.

Головними тенденціями сучасного розвитку досліджень в рамках методу граничної рівноваги є побудова методів розрахунку стосовно до конкретних форм руйнування елементів, удосконалення розрахункового опису напружено-деформованого стану і уточнення існуючих методів за рахунок урахування впливу на несучу здатність різних факторів. При цьому у переважній більшості досліджень розглядалося руйнування внаслідок роздроблення бетону над похилою

тріщиною, в меншій мірі вивчалось руйнування по похилій смузі між опорою та вантажем і лише обмежена кількість робіт присвячена руйнуванню внаслідок зрізу бетону над похилою тріщиною, по смузі між похилими тріщинами і по розтягнутій зоні при дії поперечних сил. В результаті проведених досліджень розроблені різні розрахункові моделі, засоби визначення внутрішніх зусиль і обчислення граничної поперечної сили, яку сприймає елемент. Проте, ні проблема розрахунку міцності цілому, ні стосовно до окремих форм руйнування до теперішнього часу не одержала задовільного вирішення. Значна розбіжність між розрахунками і дослідом зберігається, що є наслідком наближеної розрахункової оцінки внутрішніх зусиль і факторів, які впливають на несучу здатність елементів.

До основних результатів досліджень в галузі тріщиностійкості залізобетонних елементів при дії поперечних сил належать: класифікація похилих тріщин і розробка методів розрахунку їх утворення (роботи М.С.Борішанського, Г.М.Власова, О.Б.Голишева, Л.О.Дорошкіевича, О.С.Залесова, О.С.Зорича, О.Ф.Ільїна, Л.В.Кузнецова, Е.А.Троїцького, Б.А.Шостока, О.В.Яшина, Ф.Леонгардта, Р.Фергюсена та інш.); призначення критеріїв розрахункової оцінки ширини розкриття похилих тріщин (роботи Ю.О.Волкова, О.Б.Голишева, О.С.Залесова, Ю.В.Максимова, Г.О.Смоляго та інш.); розроблені методи розрахунку ширини розкриття похилих тріщин (роботи Ю.О.Волкова, О.Б.Голишева, О.С.Залесова, О.Ф.Ільїна, А.П.Кудзїса, С.А.Корейби, Г.О.Смоляго, В.І.Солеменка; Н.Ганесена, П.Десаї, Л.Манойлова, А.Плакса, П.Рігана та інш.). Аналіз проведених досліджень достоїнств і недоліків існуючих методів виявив необхідність і найбільш перспективні напрямки подальшого удосконалення розрахункового апарату по оцінці тріщиностійкості елементів. В розрахунку по утворенню тріщин – це вироблення єдиного критерію утворення нормальних і похилих тріщин, побудова розрахункових моделей, орієнтованих на конкретний тип тріщин, виконання розрахунку на основі методу граничного стану. Найбільш перспективними напрямками розвитку теоретичних досліджень ширини розкриття похилих тріщин є побудова розрахункового апарату на основі загальних фізичних уявлень про процес розкриття тріщин як накопичення відносних взаємних зміщень арматури і бетону на ділянках активного зчеплення, урахування реального напружено-деформованого стану і розподілу внутрішніх зусиль в різних елементах.

Деформативність залишається найменш вивченим питанням опору

елементів дії поперечних сил. У відсутності фізичної і розрахункової моделей на ділянках з похилими тріщинами кривизна і деформації зсуву визначаються наближено на базі вихідних передумов, зокрема гіпотези плоских перерізів, неправомочних для ділянок елементів, де є похилі тріщини і діють поперечні сили. Недосконалість розрахункового апарату призводить до суттєвої розбіжності з досвідом і знижує надійність конструкцій, прогини яких близькі до граничних.

На завершення розділу відзначається, що в сучасних умовах, які характеризуються зростаючими обсягами застосування залізобетону і необхідністю раціональних витрат матеріальних ресурсів, опір елементів дії поперечних сил являє собою велику проблему, яка має важливе наукове і народногосподарське значення. При цьому сукупність результатів, проведених експериментально-теоретичних досліджень, створила об'єктивні передумови для нового якісного кроку вперед у вирішенні проблеми - створенню теорії опору залізобетонних елементів дії поперечних сил.

Другий розділ присвячений розробці теоретичних основ опору елементів дії поперечних сил, включав в себе класифікацію елементів і стадій їх напружено-деформованого стану, вироблення загальної концепції і основоположних принципів побудови розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності.

Особливе місце поперечних сил серед інших силових факторів визначається неоднозначністю загальної картини опору, істотною різницею напружено-деформованого стану, характеру тріщинотворення і руйнування різних елементів. Мета класифікації - поділити елементи на базі принципових відмінностей їх опору дії поперечних сил. Основуючись на наведеному у першому розділі аналізі, як критерій класифікації була прийнята форма руйнування елемента по бетону стислої зони, в якій в узагальненому вигляді знаходять своє відображення всі основні закономірності опору - процеси утворення, розвитку і розкриття тріщин, деформування, напружено-деформованого стану (бетону, поздовжньої і поперечної арматури) на різних стадіях навантаження. В світлі прийнятого критерію і можливих форм руйнування залізобетонні елементи, які працюють на оприйняття поперечних сил, були поділені на чотири групи:

- елементи, які руйнуються внаслідок роздроблення бетону над критичною похилою тріщиною;
- елементи, які руйнуються внаслідок зрізу бетону над кри-

тичною похилою тріщиною;

- елементи, які руйнуються по похилій смузї між опором та вантажом;

- елементи, які руйнуються по похилій смузї між похилими тріщинами.

Руйнування по розтягнутій зоні не вносить принципових змін у загальну картину тріщиноутворення і напружено-деформованого стану, тому можливість такого руйнування в кожній із класифікованих груп розглядалась окремо.

В процесі навантаження, який супроводжується утворенням, розвитком і розкриттям тріщин, напружено-деформований стан елементів зазнає значних змін, які з одного боку відбивають специфіку опору відповідної групи, а з іншого - підпорядковуються закономірностям, загальним для всіх елементів, що сприймають поперечні сили. Аналіз результатів проведених експериментів дозволив виділити чотири стадії відбиваючі якісні зміни напружено-деформованого стану елементів в процесі навантаження: стадія I - до утворення тріщин, стадія II - утворення і розвитку нормальних тріщин, стадія III - утворення і розвитку похилих тріщин; стадія IV - вичерпання несучої здатності (руйнування). Далі, в світлі прийнятої класифікації дана загальна характеристика, якісна і кількісна оцінки напружено-деформованого стану елементів кожної групи на усіх стадіях, що виділялися.

Враховуючи неоднозначність характеру тріщиноутворення, форм руйнування і напружено-деформованого стану різних елементів, як базову концепцію теорії розрахунку було прийнято побудову методів розрахунку міцності, тріщиностійкості і деформативності стосовно до кожної з класифікованих груп елементів. Сформульовані в роботі основні принципи структурної побудови розрахункового апарату передбачали розробку фізичної і впливаючої з неї розрахункової моделі елементів, визначення внутрішніх зусиль на стадіях навантаження, що відповідають виконуваному розрахунку, складання і розв'язання систем рівнянь відносно вишукуваних величин - навантаження утворення, ширини розкриття тріщин, переміщень і несучої здатності елементів. Теоретичною основою побудови методів розрахунку при цьому були:

- при розрахунку міцності і утворення тріщин - метод граничного стану;

- при розрахунку ширини розкриття тріщин - уявлення ширини

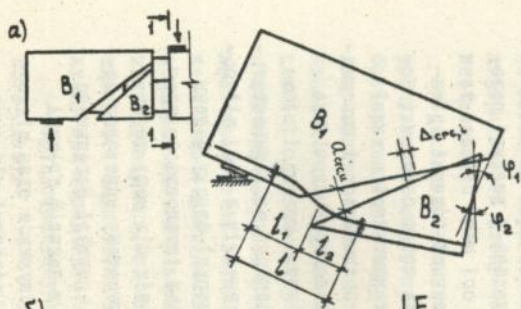
розкриття тріщин як суми відносних взаємних зміщень арматури і бетону по довжині ділянок активного сцеплення;

- при розрахунку по деформаціям - визначення переміщень елементів, як переміщень відповідних розрахункових моделей за умови рівності робіт внутрішніх і зовнішніх сил.

Третій розділ присвячений розробці методів розрахунку міцності.

Елементи, які руйнуються внаслідок роздроблення бетону над критичною похилою тріщиною. Наявність зон концентрації деформацій бетону - в районі вершини критичної похилої тріщини, а поздовжньої і поперечної арматури - в місцях перетину нормальною і критичною похилою тріщинами, дозволяють прийняти фізичну модель елемента у вигляді дисково-в'язевої системи, що складається з бетонних блоків (дисків), з'єднаних між собою піддатливими в'язями. Згідно з положенням, основних тріщин і зон концентрації деформацій, дисково-в'язеву систему у прогні зрізу складають (рис. 1,а): блоки B_1 і B_2 ; в'язи, які моделюють відповідно бетон стислої зони над і під вершиною критичної похилої тріщини, поздовжню і поперечну арматуру в місцях перетину нормальною і критичною похилою тріщинами.

Кінематична схема деформування системи подана у вигляді повороту блоків B_1 і B_2 відносно горизонтальної осі межі стислої зони в перетині I-I (рис. 1,а): до утворення критичної похилої тріщини блоки B_1 і B_2 розглядаються з'єднаними між собою бетоном і повертаються на однаковий кут; після утворення критичної похилої тріщини блоки B_1 і B_2 з'єднуються між собою поздовжньою і поперечною арматурою, внаслідком деформування яких є поворот блоків на різний кут, відповідно φ_1 і φ_2 . Прийняті фізична модель і кінематична схема деформування дають логічне пояснення експериментальній картині напружено-деформованого стану елементів в зоні зіл поперечних сил - переламу епюри деформацій (напруг) стиску бетону у вершині критичної похилої тріщини і їх більш інтенсивному зростанню в процесі навантаження над тріщиною, ніж під нею; характерному згину поздовжньої арматури в місці перетину критичною похилою тріщиною, що свідчить про виникнення в арматурі нагального зусилля; причинам виникнення сил зачеплення в похилій тріщині (повертаючись на різний кут блоки B_1 і B_2 зміщуються один відносно іншого, що при короткій поверхні блоків і відстані між ними, спільноірній з переміщеннями, що отримуються, призводить до



б)

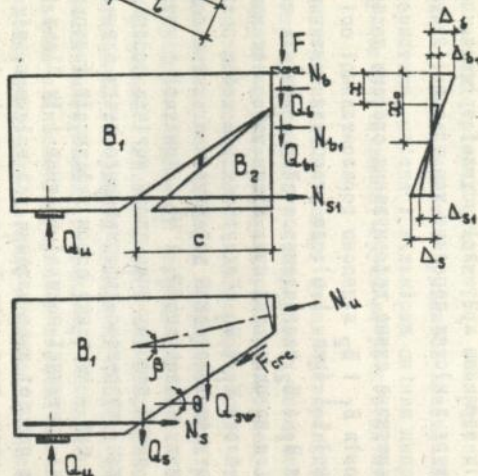
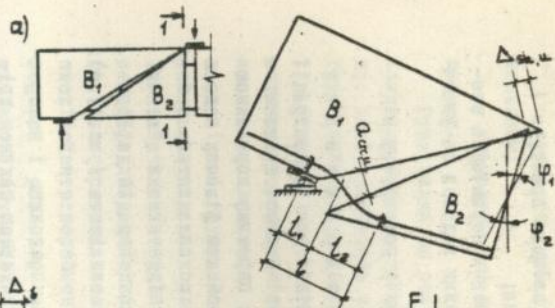


Рис. 1. Фізична модель, схема деформування (а) і розрахункова модель (б) елементів, які руйнуються внаслідок роздроблення бетону над критичною похилою тріщиною



б)

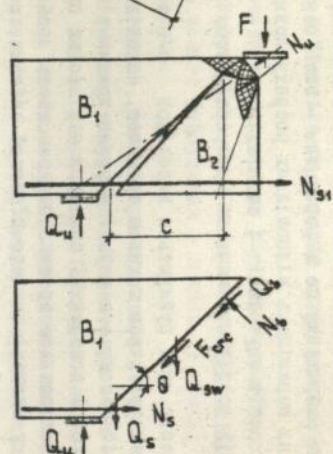


Рис. 2. Фізична модель, схема деформування (а) і розрахункова модель (б) елементів, які руйнуються внаслідок різку бетону над критичною похилою тріщиною

виникнення дотичних напруг зачеплення).

Розрахункова модель елемента випливала з прийнятої фізичної моделі і розглядала як внутрішні зусилля в елементі зусилля в "язях дисково-в'язевої системи і сили зачеплення між блоками B_1 і B_2 , які виникають в процесі деформування системи.

Гранична поперечна сила, яку оприймає елемент, визначалась з рівняння рівноваги блоку B_1 на вертикальну вісь (рис. 1,б):

$$Q_u = Q_b + Q_{sw} + Q_s + F_{csc} \sin \theta \quad (1)$$

Зусилля в бетоні над критичною похилою тріщиною знаходились з розгляду граничної рівноваги зрізаного бетонного клину, навантаженого осьовою стискаючою силою N_u - рівнодіючою поздовжнього і поперечного зусиль N_b і Q_b (рис. 1,б). Величина граничного навантаження на клин і її залежність від кута нахилу граней визначалась на основі відомих рішень теорії пластичності Г.О.Генієва. Після апроксимації теоретичної залежності в реальному, для випадку, що розглядається, діапазоні зміни кута нахилу граней, були одержані такі формули для обчислення рівнодіючого зусилля в бетоні над тріщиною і його вертикальної і горизонтальної складових:

$$N_u = R_b b x (1 + 0,7\beta) / \cos \beta ; \quad (2)$$

$$Q_b = R_b b x (1 + 0,7\beta) \cdot \operatorname{tg} \beta ; \quad (3)$$

$$N_b = R_b b x (1 + 0,7\beta) . \quad (4)$$

Зусилля в поперечній арматурі визначались за відомою формулою:

$$Q_{sw} = q_{sw} c \quad (5)$$

при граничних значеннях напруг в арматурі і довжині горизонтальної проєкції критичної похилої тріщини c , яка знаходилась з рівняння рівноваги моментів для блоку B_1 відносно точки перетину поздовжньої арматури критичною похилою тріщиною.

Нагельне зусилля в поздовжній арматурі знаходилося з розгляду арматури в місці перетину критичною похилою тріщиною у вигляді стержня, що затиснутий у блоки B_1 і B_2 , кінці якого в процесі деформування елемента як дисково-в'язевої системи повертаються разом з відповідними блоками на кути φ_1 і φ_2 , зміщуючись при

цьому один відносно іншого (рис. 1,б). В рамках прийнятої моделі нагельне зусилля в арматурі знаходилось як поперечна сила в затиснутому стержні при повороті і зміщенні його кінців:

$$Q_s = \frac{12 E_s J_s}{l^3} c (\varphi_1 - \varphi_2) \left(1 + \frac{l_1 - 0.5l}{c}\right). \quad (6)$$

Довжина умовного стержня l і максимальні значення нагельного зусилля з позицій можливого досягання граничного стану в поздовжній арматурі і бетоні, що її сточує, визначались при розв'язанні задачі опору арматурного стержня, розташованого у бетонному масиві, при поздовжньо-поперечному згині. Розрахункова модель стержня була прийнята у вигляді балки, що затиснута у пружну основу. Коефіцієнт постелі бетонної основи під арматурним стержнем, зважаючи на значну розбіжність у існуючих емпіричних оцінках, визначався теоретичним шляхом на основі розв'язання плоскої задачі дії кругового штампю на бетонну основу. Одержана при цьому залежність, як виявило порівняння, має необхідну точність і узгоджується з результатами відповідних експериментів. В рамках розрахункової моделі, що була прийнята, розглянуті три можливі форми вичерпання несучої здатності: досягання граничного стану в бетоні (зім'яття - при дії зсуваючої сили у напрямку масива, розколювання - при дії зсуваючої сили у напрямку шару обмеженої висоти); досягання граничного стану в арматурному стержні; одночасне досягання граничного стану в бетоні і арматурі. Для кожної з форм вичерпання несучої здатності одержані відповідні розрахункові залежності, до основи яких покладені: при зім'ятті бетону - умова міцності бетону при плоскому деформованому стані Г.О.Генієва; при досяганні граничного стану в арматурі - відоме рішення теорії пластичності для поздовжньо-поперечного згину; при розколюванні бетону - досягання розтягуючими напругами у бетоні на ділянках розколювання граничних значень R_{ct} .

При розповсюдженні результатів проведених досліджень на розрахунок нагельного ефекту в поздовжній арматурі враховувалась реальна картина деформування арматури в місці перетину критичною похилою тріщиною (зсув у напрямку тонкого захисного шару у блоці B_1 і бетонного масиву у блоці B_2 , рис. 1,б), в світлі якої визначалась довжина умовного стержня і її складові l_1 і l_2 , а обчислена за (6) величина нагельного зусилля обмежувалась з позицій

можливого розколювання бетону у блоці B_1 , зім'яття бетону у блоці B_2 і досягання граничного стану в арматурі. Осьове зусилля в поздовжній арматурі при цьому визначалось з рівняння рівноваги блока B_1 на горизонтальну вісь:

$$N_s = N_b + F_{csc} \cos \theta. \quad (7)$$

Результати досліджень опору арматурного стержня в бетонному масиві були також розповсюджені на розрахунок анкерних стержнів закладних деталей, в рамках якого було виконано порівняння з результатами експериментальних даних випробування окремих стержнів при зсуві у напрямку масива і шару обмеженої висоти, стержнів у складі закладних деталей при дії зсуваючої сили і сумісній дії зсуваючої і розтягуючої сил. В оброблених дослідах в широкому діапазоні змінювались всі основні параметри - міцнісні характеристики бетону і арматури ($R = 14,4 \dots 61,8$ МПа, $R_s = 327 \dots 467$ МПа), діаметр арматурних стержнів ($d = 8 \dots 22$ мм), співвідношення між розтягуючою і зсуваючою силами ($N/Q = 0 \dots 0,9$). Виявлено, що одержані формули мають необхідну точність, більш високу у порівнянні з розрахунками за діючими нормами і нормами Європейського комітету по бетону, вірно відображають вплив на величину граничного навантаження найбільш значних факторів.

Сили зачеплення, що діють уздовж критичної похилої тріщини, знаходились по загальній формулі:

$$F_{csc} = \int_0^{l_{csc}} \Delta_{csc,i} G_{csc} b dt \leq F_{csc,u}, \quad (8)$$

де $\Delta_{csc,i}$ - зміщення блока B_1 відносно блоку B_2 в точці, що розглядається, уздовж критичної похилої тріщини, яке визначається з умови деформування елемента як дисково-в'язевої системи (рис. 1,а); G_{csc} - коефіцієнт постелі зсуву для бетонних поверхнь, що утворені тріщиною; $l_{csc} = (h-x) / \sin \theta \leq a_{csc,u} / (\varphi_1 - \varphi_2)$ - довжина критичної похилої тріщини, на якій діють сили зачеплення; $a_{csc,u}$ - гранична ширина розкриття тріщини, при якій наявність сил зачеплення можна знехтувати; $F_{csc,u} = \int_0^{l_{csc}} \tau_{csc,u} b dt$ і $\tau_{csc,u}$ - граничні величини сил і дотичних напруг зачеплення.

Дослідження сил зачеплення включало проведення спеціальних

експериментів по визначенню коефіцієнта постелі зсуву граничних значень дотичних напруг зачеплення, деформацій зсуву і ширини розкриття тріщини. Дослідні бетонні зразки спочатку розколювались у серединній площині, а потім зсувались один відносно іншого з контролем навантаження, що прикладалося, і вимірюваннями відповідних деформацій зсуву. Варіюваними факторами при цьому були міцність бетону ($R = 22...48$ МПа) і ширина розкриття тріщин ($Q_{стс} = 0,05...1,0$ мм). В результаті досліджень одержані експериментальні залежності дотичних напруг зачеплення ($\tau_{стс}$) від деформацій зсуву ($\Delta_{стс}$) на всьому варіюваному діапазоні ширини розкриття тріщин, визначені граничні значення дотичних напруг ($\tau_{стс,л}$) і деформацій зсуву ($\Delta_{стс,л}$) і їх залежність від ширини розкриття тріщини. При цьому виявлено більш значний вплив на величини $\tau_{стс}$ ($\tau_{стс,л}$), $\Delta_{стс}$ ($\Delta_{стс,л}$) ширини розкриття тріщини у порівнянні з міцністю бетону, останній із яких має місце тільки при обмеженому розкритті $Q_{стс} < 0,05...0,20$ мм. В світлі викладеного, шукані розрахункові параметри $\sigma_{стс}$ і $\tau_{стс,л}$ були виражені у функції ширини розкриття тріщини і визначались за формулами, які були одержані відповідно на основі лінійної апроксимації висхідних частків дослідних залежностей $\tau_{стс} = f(\Delta_{стс}, Q_{стс})$ і апроксимації дослідної залежності $\tau_{стс,л} = f(Q_{стс,л})$ з залученням експериментальних даних аналогічних досліджень інших авторів. На основі результатів експерименту, як гранична ширина розкриття тріщини була прийнята величина $Q_{стс,л} = 1,0$ мм, при якій дотичні напруги зачеплення зменшувались до значень ($\tau_{стс} < 0,1$ МПа), мінімальних з позицій доцільності їх урахування у розрахунку.

На стадії граничної рівноваги, згідно з розрахунковою моделлю елемента (рис. 1,б) і формулами для обчислення внутрішніх зусиль, що наведені вище, невідомими є вісім величин, до яких належать геометричні параметри (x, x_0, c), внутрішні зусилля ($N_s, N_{s1}, N_{b1}, Q_{b1}$) і опорна реакція Q_u , як функція зовнішнього навантаження. Для визначення невідомих була використана система восьми рівнянь, яка включала шість рівнянь рівноваги (по три для блока B_1 і елемента у перерізі I-I) і дві умови деформування елемента як дисково-в'язевої системи у вигляді повороту блоків B_1 і B_2 (рис. 1,а):

$$\frac{\Delta_6}{x_0} = \frac{\Delta_s}{h_0 - x_0}; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta t_1}{x_0 - x} = \frac{\Delta s_1}{h_0 - x}, \quad (10)$$

де Δt_1 , Δs_1 і Δt_1 , Δs_1 - деформації бетону і поздовжньої арматури (в "язів дисково-в'язевої системи) відповідно при повороті блоків B_1 і B_2 . Гранична поперечна сила Q_u , яка сприймається елементом, визначалась з рівняння рівноваги (1) при розв'язанні загальної системи рівнянь.

Розглянуті можливі форми руйнування елементів по розтягнутій зоні внаслідок досягання граничного стану в поздовжній арматурі у місці перетину критичною похилою тріщиною та втрати зчеплення поздовжньої арматури з бетоном. Як критерій руйнування було прийнято досягання поздовжнім зусиллям в арматурі граничних значень $N_{s,u}$, що визначались, відповідно виходячи з граничного стану арматури при поздовжньо-поперечному згині і умови її анкерування за критичною похилою тріщиною. Міцність елемента по розтягнутій зоні перевірялась з умови $N_s \leq N_{s,u}$, де N_s - зусилля в поздовжній арматурі обчислене за (7), $N_{s,u}$ - менше з граничних зусиль при можливих формах руйнування. Величина поперечної сили, що відповідає руйнуванню по розтягнутій зоні, при цьому визначалась з рівняння рівноваги моментів внутрішніх і зовнішніх сил для блока B_1 відносно точки прикладення рівнодіючого зусилля в бетоні стислої зони при меншому з обчислених граничних зусиль в арматурі.

Елементи, які руйнуються внаслідок зриву бетону над критичною похилою тріщиною. Зважаючи на недостатню вивченість питання опору таких елементів, розробці розрахункового апарату передувало проведення спеціальних експериментальних досліджень. Метою експеримента було одержання дослідних даних про процеси утворення, розвитку і розкриття тріщин, напружено-деформований стан бетону поздовжньої і поперечної арматури, характер деформування і несучу здатність елементів.

Основний експеримент включав в себе випробування 24 дослідних балок, в яких варіюваними факторами були довжина прогину зрізу і інтенсивність поперечного армування. При цьому довжина прогину зрізу змінювалась у широкому діапазоні, з тим щоб на межах діапазону дослідити перехід до інших форм руйнування - роздроблення бетону над критичною похилою тріщиною і по смузі між опорою та вантажем. В процесі досліджень вимірювались деформації бетону, поздовжньої і поперечної арматури, ширина розкриття тріщин, пере-

5-2-7712

Ліс Ім. В. Стефанія
АН УРСР

міщення дослідних балок, кути повороту приопорної та прогінної частин балок, які роз'єднані критичною похилою тріщиною, і їх зсув один відносно іншого. Паралельно проводилися випробування спеціальних бетонних зразків на зріз з метою одержання залежності $\tau_{sh} - \Delta_{sh}$, визначення граничних значень дотичних напруг та деформацій зсуву.

В результаті проведених експериментів виявлені основні закономірності опору елементів, які руйнуються внаслідок зрізу бетону стислої зони. Критична похила тріщина розвивається по прямій, що з'єднує внутрішню грань опорної і зовнішню грань вантажної площадок. Руйнування має крихкий характер, супроводжується вихідом критичної похилої тріщини на стислу грань, відділенням приопорної частини балок та її зсувом уздовж тріщини відносно прогінної. Зона концентрації деформацій бетону розташовується у кінці прогину зрізу поблизу вершини критичної похилої тріщини, поперечної і поздовжньої арматури - в місцях перетину критичною тріщиною. При цьому характер деформування верхніх і нижніх волокон стержнів поздовжньої арматури у місці перетину критичною тріщиною свідчив про наявність нагельного ефекта в арматурі. Одержано експериментальне підтвердження прийнятим вище закономірностям деформування елементів в зоні дії поперечних сил. До утворення критичної похилої тріщини кути повороту приопорної і прогінної частин дослідних балок були близькі один одному, а зміщення між ними було практично відсутнім. Після утворення критичної тріщини кути повороту приопорної частини в процесі навантаження зростали більш інтенсивно у порівнянні з прогінною, наближуючись до кута повороту опорного перерізу. При цьому із збільшенням навантаження різниця між кутами повороту частин елемента, які були роз'єднані критичною похилою тріщиною, збільшувалась. Описаний процес супроводжувався інтенсивним зростанням взаємних зміщень частин балок уздовж критичної похилої тріщини, величина яких на стадії руйнування досягала значень близьких до граничних деформацій бетону при зсуві, одержаних при випробуванні спеціальних зразків.

На основі одержаних дослідних даних були прийняті фізична модель елемента у вигляді дисково-в'язевої системи і відповідна їй розрахункова модель, що наведені на рис. 2. Умова деформування системи приймалась у вигляді повороту блоків B_1 і B_2 відносно

горизонтальної осі - межі стислої зони у перерізі I-I (рис. 2,а). Як внутрішні зусилля в елементі розглядались зусилля у зв'язках і сили зачеплення між блоками B_1 і B_2 , що виникають в процесі деформування системи. Критерієм руйнування елемента приймалось досягання граничного стану у бетоні стислої зони на продовженні критичної похилої тріщини.

Гранична поперечна сила, що сприймалась елементом, визначалась з рівняння рівноваги блока B_1 на вертикальну вісь (рис. 2,б):

$$Q_u = Q_b \sin \theta + Q_{sw} + Q_s + F_{csc} \sin \theta - N_b \cos \theta. (11)$$

Бетон стислої зони розглядався у вигляді зрізаного клину, який навантажений осьовою стискаючою силою, що спрямована від вантажа до опори (рис. 2,б). Зусилля у бетоні над критичною похилою тріщиною Q_b і N_b визначались на основі розгляду граничного стану клина на площадках руйнування, які є продовженням тріщини. При цьому приймалось, що вершина критичної похилої тріщини розміщується у меж характерних зон стиску у тілі клину (рис. 2,б).

Зусилля в поперечній арматурі Q_{sw} обчислювалось за загальною формулою (5) при відповідній довжині горизонтальної проєкції критичної похилої тріщини (рис. 2,б).

Поздовжня арматура у місці перетину критичною похилою тріщиною розглядалась у вигляді стержня, що затиснутий у блоки B_1 і B_2 , кінці якого переміщуються разом з відповідними блоками (рис. 2,а). Осьове зусилля в поздовжній арматурі визначалось з рівняння рівноваги блока B_1 на горизонтальну вісь:

$$N_s = Q_b \cos \theta + F_{csc} \cos \theta + N_b \sin \theta, (12)$$

а нагельне зусилля - за загальною формулою (6). Довжина умовного стержня l і її складаюча l_1 при цьому знаходились при розгляді бетону над опорною площадку у вигляді пружної основи кінцевої висоти. Обчислена величина нагельного зусилля обмежувалась з позицій можливого досягання граничного стану в арматурі і бетоні (зім'яття у блоках B_1 і B_2), що її оточує.

Сили зачеплення F_{csc} знаходились за загальною формулою (8) при величині взаємних зміщень блоків B_1 і B_2 в вершині критичної похилої тріщини рівній граничним деформаціям бетону при зсуві

$\Delta_{sk,u}$ (рис. 2, а).

Невідомі параметри, що були необхідні для обчислення внутрішніх зусиль і граничної поперечної сили за (II), визначались при сумісному розв'язанні рівнянь рівноваги та умов деформування елемента у вигляді повороту блоків B_1 і B_2 .

Міцність елемента по розтягнутій зоні, по аналогії з викладеним вище, перевірялась при порівнянні зусилля в поздовжній арматурі N_s за (12) з граничними значеннями $N_{s,u}$ ($N_s \leq N_{s,u}$), які відповідають досяганню граничного стану в арматурі чи утрати її сцеплення з бетоном.

Характерною конструктивною особливістю елементів, що руйнуються по похилій смузі, є насиченість зони руйнування поперечною арматурою, наявність якої справляє значний вплив на несучу здатність, але не враховується у розрахунках зовсім чи враховується досить наближено з цілим рядом обмежень.

Вплив арматури на міцність похилої смуги оцінювався у роботі на основі розробленого варіанту теорії граничного напруженого стану залізобетону. Відмінною особливістю розробленого варіанту є розгляд арматури, яка довільно розташована у бетонному масиві, як внутрішньої в'язі, що забезпечує стиснення поперечних деформацій і як наслідок зміну напруженого стану бетону при заданому навантаженні. Приймаючи як критерій міцності умову Г.О.Генієва, були розглянуті різні випадки навантаження (стиск, стиск-стиск, стиск-розтяг з передачею розтягуючого зусилля безпосередньо на бетон та через розтягнуту арматуру) при довільному розташуванні арматури у бетонному масиві. Одержані відповідні формули для обчислення граничних напруг як функції міцнісних характеристик бетону і арматури, інтенсивності, орієнтації та напруг у арматурі при передачі через неї зусиль на бетон. В рамках апробації теорії був розглянутий розрахунок стиснутих залізобетонних елементів з скісним армуванням. Одержані розрахункові формули і виконано масове порівняння з результатами експериментів, яке виявило досить високу точність розрахункового апарату і правильність відображення їм впливу на несучу здатність елементів, основних факторів - інтенсивності скісного армування, міцнісних характеристик бетону і арматури та співвідношення між ними.

Розроблений варіант теорії граничного напруженого стану залізобетону був розповсюджений на розрахунок елементів, які

руйнуються в зоні дії поперечних сил по похилій смузі між опорою та вантажем і між похилими тріщинами.

В розвитку відомих досліджень Т.І.Баранової, О.С.Залесова, Б.С.Соколова, Т.Хегберга та інш., розрахунок елементів, які руйнуються по похилій смузі між опорою та вантажем (консоли колон, балки-стілки та інш.), виконувався на основі удосконаленої моделі каркасно-стержневої системи (рис. 3). У традиційну розрахункову модель вводились піддатливі зв'язі, які моделювали відповідно нагельне зусилля в поздовжній арматурі (в'язь 1), осьове та нагельне зусилля в поперечній арматурі (в'язі 2 та 3), поперечне зусилля в бетоні стислої зони (в'язь 4). Піддатливість зв'язів 1 та 3 визначалась з розгляду поздовжньої і поперечної арматури у вигляді стержня, що затиснутий у бетонний масив по обидва боки від місця перетину тріщиною, в'язі 2 - на основі теорії деформування залізобетону з тріщинами М.І.Карпенка, в'язі 4 - у функції жорсткісних параметрів зсуву бетону стислої зони.

В рамках прийнятої моделі, розрахунок міцності елемента по похилій смузі між опорою та вантажем і по розтягнутій зоні включав визначення зусиль в стержнях та зв'язях статично невизначеної розрахункової моделі при заданій величині зовнішнього навантаження і перевірку відповідних умов міцності:

$$N_b \leq N_{b,u} ; \quad N_s \leq N_{s,u} , \quad (13)$$

де N_b і N_s - зусилля, що діють у смузі і розтягнутій арматурі; $N_{b,u} = \sigma_{b,u} A_b$ - граничне зусилля, що сприймається смугою; $\sigma_{b,u}$ і A_b - відповідно граничні напруги у смузі, обчислені на основі розробленого варіанту теорії граничного напруженого стану залізобетону для навантаження "стиск-розтяг" з передачею розтягуючого зусилля на бетон через арматуру, і площа поперечного перерізу смуги; $N_{s,u}$ - граничне зусилля в поздовжній розтягнутій арматурі в місці перетину похилими тріщинами, що утворюють смугу, при поздовжньо-поперечному згині і утраті зчеплення арматури з бетоном.

Руйнування по похилій смузі між похилими тріщинами є основною формою руйнування в зоні дії поперечних сил двотаврових елементів з розвиненими армованими полицками та тонкою стінкою. Розрахункова модель (рис. 4) розглядала двотаврові елементи з тон-

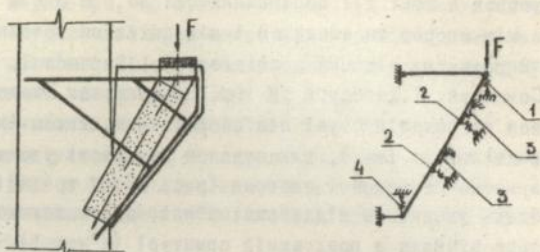


Рис. 3. Розрахункова модель елементів, які руйнуються по похилій смужі між опорою та вантажем

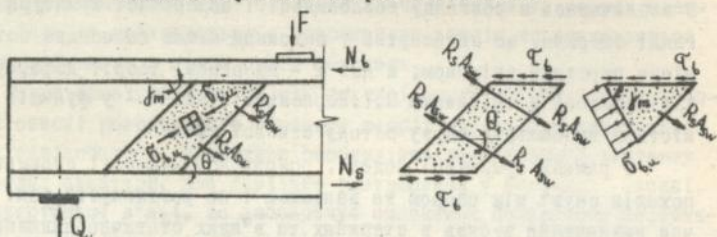


Рис. 4. Розрахункова модель елементів, які руйнуються по похилій смужі між похилими тріщинами

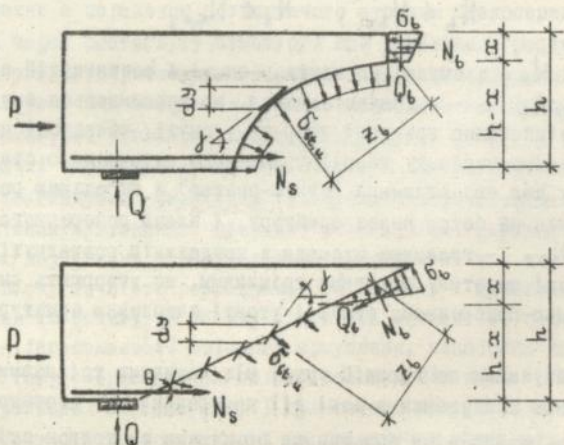


Рис. 5. Розрахункова модель елементів на стадії утворення тріщин в зоні дії поперечних сил

кою стінкою, як такі, що складаються з поєів (полічек), які працюють відповідно на стиск і розтяг, і стінки, яка сприймає поперечну силу. При цьому, у нормальному перерізі поперечна сила сприймається системою похилих армованих бетонних смуг, а у похилому перерізі, що збігається з відповідною тріщиною, — поперечною арматурою.

Граничний стан елемента при формі руйнування, що розглядається, визначається граничним станом армованої бетонної смуги, яка виділена похилими тріщинами і завантажена дотичним зусиллям на контакт з полічками і розтягуючим зусиллям, що передається на бетон через поперечну арматуру (рис. 4).

Розрахунок міцності елемента за розробленим методом включає в себе: визначення з рівнянь рівноваги кута нахилу площадок дії головних стискуючих напруг у тілі смуги (γ_m , рис. 4); обчислення граничних значень головних напруг ($\sigma_{\theta, m}$) за розробленим варіантом теорії граничного напруженого стану для навантаження "стиск-розтяг" при передачі зусиль розтягу на бетон через арматуру; перевірку міцності елемента з позицій досягання граничного стану у смугі між похилими тріщинами за:

$$Q \leq \sigma_{\theta, m} b h_{web} \frac{\sin \theta}{\cos(\gamma_m - \theta) [\sin \gamma_m - \cos \gamma_m \operatorname{tg}(\gamma_m - \theta)]} \quad (14)$$

Руйнування двотаврових елементів з тонкою стінкою по розтягнутій зоні має свою специфіку і є наслідком розвитку похилої тріщини уздовж верхньої грані розтягнутої полічки. Як розрахунковий критерій руйнування приймалось досягання дотичними напругами в бетоні і нагельним зусиллям в поперечній арматурі на контакт стінки з полічкою відповідних граничних значень.

Для перевірки точності розроблених методів розрахунку виконано масове порівняння з результатами експериментів елементів, що належали до кожної з чотирьох класифікованих груп. При цьому у відповідні вибірки включались дані дослідів, у яких у широкому діапазоні варіювались усі основні фактори, що впливають на несучу здатність елементів, при формі руйнування, що розглядалась. Загальна вибірка включала в себе близько 250 дослідних зразків 17 авторів. У результаті порівняння виявлено, що розроблені методи розрахунку мають необхідну точність і вірно відображають ос-

новні тенденції змінювання несучої здатності, що пов'язані з впливом найбільш значних факторів – довжини прогину зрізу, інтенсивності поздовжнього та поперечного армування, міцності бетону, нахилу поперечної арматури та інших.

Четвертий розділ присвячений тріщиностійкості елементів, питанням розрахунку утворення та розкриття тріщин в зоні дії поперечних сил.

У т в о р е н н я тріщин. Аналіз численних експериментальних досліджень дозволив виділити два основних типи тріщин в зоні дії поперечних сил – тріщини, які утворюються біля розтягнутої грані та розвиваються по траєкторії близькій до траєкторії дії головних стискаючих напруг і тріщини, які утворюються у межах висоти елемента і розвиваються по прямолінійній траєкторії під кутом до поздовжньої осі.

Побудова розрахункового апарату здійснювалась на основі аналізу напружено-деформованого стану бетону по довжині траєкторії розвитку тріщин і єдиного підходу до розрахунку утворення тріщин обох типів, що базується на таких вихідних передумовах: тріщини утворюються внаслідок відриву на площадках дії головних розтягуючих напруг при досяганні останніми граничних значень в умови міцності бетону при плоскому напруженому стані; співвідношення між величинами головних напруг і положенням площадок їх дії по довжині траєкторії зберігаються до стадії утворення тріщин.

Розрахункові схеми рівноваги елемента на стадії утворення тріщин, першого і другого типів наведені на рис. 5. Розрахунок по утворенню обох типів тріщин виконувався, виходячи з рівняння рівноваги моментів зовнішніх та внутрішніх сил, відносно точки прикладення рівнодіючого зусилля в бетоні стислої зони над тріщиною:

$$M \leq M_b + M_s + M_p, \quad (15)$$

де M – момент зовнішніх сил; M_b – момент, що створюється зусиллям в бетоні розтягнутої зони на площадках дії головних розтягуючих напруг на стадії утворення тріщин; M_s і M_p – моменти, що створюються зусиллям в поздовжній арматурі розтягнутої зони і зусиллям попереднього обтискання.

Момент M_b для тріщин обох типів визначається як сума моментів, що створюються граничним зусиллям на елементарній площадці дії

головних розтягуючих напруг по довжині відповідних траєкторій розвитку тріщин (рис. 5):

$$M_b = \int_0^{h-x} \frac{R_{tt} b z_b}{\sin \gamma} dy, \quad (16)$$

де γ - кут нахилу площадки дії головних розтягуючих напруг у точці траєкторії, що розглядається. Інтегрування за (16) виконувалось на основі даних досліджень напружено-деформованого стану, аналітичного опису кривих траєкторій головних стискаючих напруг (тріщини першого типу), закономірностей змінювання кута нахилу площадок головних розтягуючих напруг по довжині траєкторії і напрямку розвитку тріщин другого типу, що заданий кутом θ (рис.5).

Виконане порівняння з масивом дослідних даних, який включав до себе більш ніж 250 зразків з широким діапазоном варіювання найбільш значних факторів (довжини прогину зрізу, розмірів та форми поперечного перерізу, міцності бетону, рівня попереднього обтискання, інтенсивності поздовжнього армування) виявило досить високу точність розробленого розрахункового апарату оцінки утворення тріщин в зоні дії поперечних сил.

Р о з к р и т т я тріщин. Основні положення теорії опору елементів дії поперечних сил при розрахунку ширини розкриття тріщин передбачали: побудову розрахункового апарату стосовно до кожної з чотирьох груп класифікованих елементів на базі відповідних фізичних та розрахункових моделей, прийняття як розрахункових величин ширини розкриття тріщини розкриття критичної похилої тріщини на рівні поздовжньої арматури і середнє розкриття критичної тріщини у місцях перетину поперечної арматури; визначення ширини розкриття тріщини, як суми відносних взаємних зміщень арматури та бетону на довжині ділянок активного зчеплення, які розташовані по обидва боки від тріщини

$$a_{\text{крт}} = 2 \int_0^{l_s} [\epsilon_s(t) - \epsilon_b(t)] dt = 2 \int_0^{l_s} \epsilon_q(t) dt. \quad (17)$$

Відповідно (17), приймаючи закон зчеплення у вигляді $\tau_b(t) = G_{ts} \epsilon_q(t)$, ширина розкриття критичної похилої тріщини на рівні поздовжньої і в місцях перетину поперечної арматури, визначалась за загальною формулою:

$$a_{c2c} = 2\eta(1 - e^{-l_s/\eta d_{s(sw)}}) d_{s(sw)} E_{s(sw)}, \quad (18)$$

де $\eta = 0.25 E_{s(sw)} / G_{66} (1 + 2\alpha \int \mu_{s(sw)})$; $E_{s(sw)}$ - деформація поздовжньої і середні деформації поперечної арматури в місцях перетину критичною похилою тріщиною при заданому зовнішньому навантаженні, що обчислюються у функції відповідних зусиль за $E_s = N_s / A_s E_s$ і $E_{sw} = Q_{sw} / \sum A_{sw} E_{sw}$; $l_{s(sw)}$ - довжина активно-зчеплення, яка приймається рівною мінімальній довжині анкерування стержнів поздовжньої та поперечної арматури при відповідних зусиллях в останніх; G_{66} - модуль деформацій зчеплення; $\mu_{s(sw)}$ та $d_{s(sw)}$ - відповідно коефіцієнти інтенсивності армування та діаметри стержнів поздовжньої і поперечної арматури.

Зусилля в поздовжній і поперечній арматурі N_s і Q_{sw} в кожній з чотирьох класифікованих груп елементів визначались на основі відповідних фізичних і розрахункових моделей, виходячи з напружено-деформованого стану на стадії навантаження, що розглядається.

В елементах, які руйнуються внаслідок роздроблення і зрізу бетону стислої зони над критичною похилою тріщиною, зусилля N_s і Q_{sw} визначались з рівнянь рівноваги поздовжніх і поперечних сил, які прикладені до блоку V_1 , за (7), (12) та

$$Q_{sw} = Q - Q_b - Q_s - F_{c2c} \sin \theta, \quad (19)$$

$$Q_{sw} = Q - Q_b \sin \theta - Q_s - F_{c2c} \sin \theta + N_b \cos \theta \quad (20)$$

в рамках розв'язання загальних систем рівнянь, що включали рівняння рівноваги і умови деформування у вигляді повороту блоків V_1 і V_2 . При цьому нагельне зусилля в поздовжній арматурі і сили зачеплення Q_s і F_{c2c} знаходились за наведеними вище загальними формулами.

В елементах, які руйнуються по похилій смужі між опором та вантажем, зусилля N_s і Q_s визначались з розрахунку карнасно-стержнєвої системи з піддатливими в'язями (рис. 3), як зусилля у стержні та в'язі, що моделюють відповідно поздовжню і поперечну арматуру.

В двотаврових елементах з тонкою стінкою, які руйнуються по похилій смужі між похилими тріщинами, зусилля в поперечній арма-

турі Q_{sw} знаходилось з рівняння рівноваги елементу у перерізі з похилою тріщиною, взявши до уваги, що, згідно з прийнятою розрахунковою моделлю, діюча поперечна сила сприймається поперечною арматурою стінки.

Масив експериментальних даних, при порівнянні розрахунків з дослідом, включав результати випробувань усіх чотирьох класифікованих груп елементів, в рамках яких у широкому діапазоні змінювались усі основні фактори, що впливають на ширину розкриття тріщин в зоні дії поперечних сил - рівень навантаження ($Q/Q_u = 0,15 \dots 0,75$), відносна довжина прогину зрізу ($a/h_0 = 0,8 \dots 3,5$), параметри поперечного ($\mu_{sw} = 0,28 \dots 1,5\%$, $s/h_0 = 0,15 \dots 0,5$, $d_{sw} = 4 \dots 14$ мм) і поздовжнього ($\mu_s = 0,4 \dots 1,7\%$, $d_s = 16 \dots 28$ мм) армування. Виявлено, що розроблений розрахунковий апарат має необхідну точність і вірно відображає закономірності змінювання ширини розкриття тріщин на рівні поздовжньої і в місцях перетину поперечної арматури в процесі навантаження і функції впливу найбільш значних факторів.

П'ятий розділ - деформативність елементів при дії поперечних сил. Базова концепція теорії передбачала побудову розрахунку за деформаціями стосовно до класифікованих груп елементів на основі відповідних фізичних та розрахункових моделей. Переміщення (прогин) елементів визначались за умови рівності робіт зовнішніх і внутрішніх сил за відомою формулою Мора. При цьому переміщення, що обумовлювались деформаціями елементів в зоні дії поперечних сил, визначались як переміщення, що спричинялись деформаціями блоків, стержнів та в'язів відповідних розрахункових моделей (рис. 1...4). Внутрішні зусилля в елементах при заданій величині зовнішнього навантаження, по аналогії з розрахунком по розкриттю тріщин, визначались за наведеними вище формулами при розв'язанні загальних систем рівнянь (елементи, які руйнуються внаслідок роздроблення і зрізу бетону над критичною похилою тріщиною), розрахунку каркасно-стержнєвої системи з піддатливими в'язями (елементи, які руйнуються по похилій смужі між опорою та вантажем), сумісному розв'язанні рівнянь рівноваги моментів, поздовжніх та поперечних сил (елементи, які руйнуються по похилій смужі між похилими тріщинами).

Виходячи з викладеного вище, переміщення елементів, які руйнуються внаслідок роздроблення та зрізу бетону над критичною по-

хилою тріщиною, обумовлюються деформаціями блоків B_1 і B_2 , осьовими деформаціями поздовжньої розтягнутої арматури у межах довжини горизонтальної проєкції критичної похилої тріщини, поперечними деформаціями поздовжньої арматури в місцях перетину критичною похилою тріщиною, осьовими деформаціями поперечної арматури в місцях перетину критичною похилою тріщиною. Переміщення елементів, які руйнуються по похилій смугі між опорою та вантажем, обумовлюються деформаціями стержнів, піддатливих в'язів і визначаються в рамках розрахунку каркасно-стержневої системи. Переміщення елементів, які руйнуються по похилій смугі між похилими тріщинами, обумовлюються осьовими деформаціями стислої полицки, осьовими деформаціями розтягнутої полицки на ділянках з нормальними тріщинами і без тріщин, осьовими деформаціями поперечної арматури в місцях перетину системою регулярних похилих тріщин.

В роботі наведені відповідні формули, в основу яких було покладено: розгляд блока B_1 як зрізаного бетонного клину, що навантажений осьовою стискаючою силою - рівнодіючою поздовжнього та поперечного зусиль у бетоні над критичною похилою тріщиною; визначення деформацій блока B_2 як деформацій бетону у межах стислої зони під критичною похилою тріщиною при дії поздовжньої і поперечної сил $N_{\text{кн}}$ і $Q_{\text{кн}}$; лінійна апроксимація епюри осьових деформацій поздовжньої арматури по довжині горизонтальної проєкції критичної похилої тріщини; розгляд поздовжньої арматури, при визначенні її поперечних деформацій в місці перетину критичною похилою тріщиною, у вигляді стержня, що застиснутий у блоки B_1 і B_2 ; опис епюри деформацій поперечної арматури по довжині ділянок активного зчеплення на основі закону зчеплення, що був прийнятий при розрахунку ширини розкриття тріщин.

Дослідження деформативності елементів при дії поперечних сил включали в себе також виробування натурних залізобетонних конструкцій - балок по серії І.225-2, що застосовуються при будівництві будівель громадського призначення. Навантаження здійснювалось зосередженими силами, що були симетрично розташовані у прогінні балок. У процесі випробувань вимірювались переміщення балок в середині прогінку і під зосередженими силами, ширина розкриття тріщин, деформації бетону та арматури в зоні дії поперечних сил. Одержані дослідні дані, разом з результатами експериментів інших авторів,

були використанні як експериментальна база для апробації розрахункового апарату, що розроблявся. Вибірка даних визначалась широким діапазоном варіювання основних факторів, які впливають на деформативність елементів при дії поперечних сил ($l/h = 4...12$; $q/h_s = 1,2...3,2$; $b/h = 0,3...0,58$; $\mu_s = 1,1...2,5\%$, $\mu_{sw} = 0...0,48\%$, $R_b = 25...40,5$ МПа). Виконане порівняння виявило близькість дослідних та розрахункових залежностей переміщень від рівня навантаження у реальному для розрахунку по деформаціям діапазоні значень зовнішнього навантаження. В той же час виявлено, що розрахунок за діючими нормами в значній мірі недооцінює деформативність елементів в зоні дії поперечних сил після утворення похилих тріщин.

Шостий розділ роботи присвячений побудові в рамках теорії опору інженерних методів розрахунку і їх розповсюдженню на широку практику розрахунків елементів при дії поперечних сил.

Інженерні методи розрахунку базувались на загальних положеннях теорії, відповідних фізичних і розрахункових моделях і спрощеннях, що вводились на підставі численого аналізу розрахунків за розробленими методами і результатів їх порівняння з дослідями. Поряд із спрощенням розрахункового апарату метою досліджень було забезпечення логічного взаємозв'язку між розрахунками міцності при різних формах руйнування за похилим перерізом з одного боку і розрахунками міцності за похилим та нормальним перерізами в зоні дії поперечних сил з іншого.

Питанню розрахункової оцінки міцності нормальних перерізів в зоні дії поперечних сил до теперішнього часу не приділялось достатньої уваги, незважаючи на те, що у ряді досліджень виявлений істотний вплив дотичних напруг в бетоні стислої зони над нормальною тріщиною на несучу здатність елементів. Розроблена в роботі розрахункова модель міцності нормальних перерізів розглядала бетон стислої зони над нормальною тріщиною як зрізаний клин, що навантажений осьовою стискаючою силою – рівнодіючою поздовжнього та поперечного зусиль в бетоні. Як критерій руйнування елемента приймалось досягання граничного стану у клині при напругах в поздовжній розтягнутій арматурі менших чи рівних границі текучесті. Міцність елемента перевірялась з умови рівноваги моментів зовнішніх та внутрішніх сил відносно точки перетину нормальною тріщиною поздовжньої арматури. Висота бетону стислої зони над нормаль-

ною тріщиною і кут нахилу рівнодіючого зусилля в бетоні при цьому визначались при сумісному розв'язанні рівнянь рівноваги поздовжніх і поперечних сил і умови деформування, що базується на гіпотезі плоских перерізів і використанні діаграм σ - ϵ для бетону і арматури.

Основні припущення, які приймалися при побудові інженерних методів розрахунку по похилим перерізам, передбачали: визначення кута нахилу рівнодіючого зусилля в бетоні над критичною похилою тріщиною за спрощеною залежністю:

$$\beta = \alpha \operatorname{ctg} \left[0,4 \frac{h_0}{a} \left(1 + \frac{h_0}{a} \right) \right] \leq \alpha \operatorname{ctg} \frac{h_0}{a} \quad ; \quad (21)$$

прийняття висоти бетону стислої зони у нормальному перерізі, що проходить через вершину критичної похилої тріщини, з розрахунку міцності за відповідним нормальним перерізом; обмеження висоти бетону стислої зони над критичною похилою тріщиною розміром основи клину, що формується вантажною площадкою (рис.2). Залежність (21) одержана на основі узагальнення і аналізу результатів розрахунків за розробленими вище методами при трьох можливих формах руйнування елементів - роздробленні бетону над критичною похилою тріщиною, зрізі бетону над критичною похилою тріщиною і руйнуванні по похилій смужі між опором та вантажем. Обмеження, що при цьому уводилось ($\beta \leq \alpha \operatorname{ctg} \frac{h_0}{a}$), відповідає переходу від моделей у вигляді дисково-в'язевих систем (рис. 1,2) до моделі каркасно-стержневої системи з піддатливими в'язями (рис. 3). Друге припущення прийнято з метою забезпечення логічного взаємозв'язку між розрахунками по похилим і нормальним перерізам, тим більше, що, як виявило порівняння, висота бетону стислої зони над нормальною тріщиною при обох розрахунках має близькі значення. Обмеження висоти бетону над критичною похилою тріщиною розмірами основи клину (третє припущення) відображає розрахунковий перехід від руйнування внаслідок роздроблення до зрізу бетону стислої зони над критичною похилою тріщиною. Припущення, що уводилось, дозволили в значній мірі спростити розв'язання загальних систем рівнянь і без зниження точності одержати розрахункові залежності, що відповідають вимогам інженерної практики.

В рамках розповсюдження методів, що розроблялись, на галузь практичних розрахунків елементів при дії поперечних сил розгля-

далися: таврові і двотаврові елементи з поличкою у стислій зоні; попередньо напружені елементи; для рівномірно розподіленого навантаження; сумісна дія поперечних сил з іншими силовими факторами; небагаторазовий і багаторазовий режими повторного навантаження. На основі проведених досліджень розроблені також рекомендації по удосконаленню розрахунку за методом ферменної аналогії норм Європейського комітету по бетону.

Наявність полички у стислій зоні враховувалось у розрахунку при визначенні рівнодіючого зусилля в бетоні над критичною похилою тріщиною, яке розглядалось як сума зусиль, що сприймається поличкою та стінкою. При цьому ширина полички, яка вводилась до розрахунку, призначалась з позицій можливого руйнування по обмеженій ширині ($b'_f \leq b'_{f,red}$).

Розрахунки міцності, тріщиностійкості і деформативності попередньо напружених елементів були побудовані, виходячи з того, що напруги і деформації поздовжньої арматури розтягнутої зони, які входять до рівнянь рівноваги та інших розрахункових залежностей, мають сумарні відповідні значення, що спричиняються попереднім напруженням і дією зовнішнього навантаження. Виходячи з викладеного вище, деформації поздовжньої арматури, які входили до умов деформування (9), (10), розрахункової залежності для обчислення ширини розкриття тріщин (18), і зусилля в поздовжній арматурі при розрахунку по деформаціям визначались як різниця між відповідними повними значеннями і значеннями деформацій та зусиль, що були спричинені попереднім напруженням. При цьому на основі діаграм $\sigma_s - \epsilon_s$ враховувалась робота арматури у галузі пружних і непружних деформацій.

У зв'язку з недостатнім вивченням питання опору дії поперечних сил елементів змінної висоти, розробці розрахункового апарату передувало проведення експериментальних досліджень, які включали випробування 22 балок з похилою стислою і розтягнутою гранями. В результаті експериментів одержані дослідні дані про закономірності процесів утворення, розвитку та розкриття тріщин, форми руйнування, несучу здатність елементів змінної висоти і її залежність від основних факторів – кута нахилу стислої чи розтягнутої граней, інтенсивності поперечного та поздовжнього армування, міцності бетону.

На основі загальної картини тріциноутворення, яка була виявлена у роботі, та праць Г.М.Власова, як традиційні нормальні для елементів змінної висоти були прийняті ламані перерізи, що нормальні до обох граней елемента і проходять по тріцині у розтягнутій і бетону у стислій зонах. При цьому відповідні зміни завнали і розрахункова модель дисково-в'язевої системи, яка формувалась похилим перерізом, що збігався з критичною похилою тріциною, і ламаним перерізом, який проходив через її вершину.

Зберігаючи загальну структуру побудови розрахункового апарату, стосовно до прийнятих моделей були складені відповідні системи рівнянь, що включали рівняння рівноваги і деформування, при розв'язанні яких були одержані формули для розрахунку міцності, тріциностійкості і деформативності елементів з похилою стислою і розтягнутою гранями при дії поперечних сил.

Загальний принцип урахування впливу факторів зовнішньої силової дії (рівномірно розподіленого навантаження, поздовжніх сил, згинаючих моментів) передбачав їх уведення у відповідні рівняння рівноваги. В роботі одержані формули для розрахунку елементів при дії рівномірно розподіленого навантаження, сумісній дії поздовжніх та поперечних сил, сформульовані основні положення побудови розрахункових моделей в різних елементах (багатопрогінних балках, колонах при дії горизонтального навантаження та інш.).

Дослідження опору елементів при повторному (небагаторазово та багаторазово) навантаженні включало проведення експериментів і розробку теоретичних основ відповідних розрахунків. Експериментальні дослідження були присвячені недостатньо вивченому до теперішнього часу питанню – опору елементів при небагаторазово повторному навантаженні, включали випробування 28 дослідних балок, метою яких було вивчення напружено-деформованого стану бетону і арматури, міцності, тріциностійкості і деформативності елементів. Як варіювані фактори були прийняті режим навантаження, максимальне навантаження циклу і довжина прогину арму. В результаті аналізу проведених експериментів, а також аналогічних дослідів у галузі витривалості виявлено, що повторне навантаження не вносить принципових змін у загальну картину тріциноутворення, напружено-деформований стан і характер руйнування елементів, що дозволяє виконувати розрахунок на основі розроблених вище фізичних і розрахункових моделей. Основоложний принцип розрахунку, який був

прийнятий у роботі, базувався на урахуванні впливу повторних навантажень на величину внутрішніх зусиль в елементі і їх перерозподіл в процесі навантаження. Загальна схема розрахунку передбачала визначення внутрішніх зусиль в елементах (бетоні над тріщиною, поздовжній і поперечній арматурі, сил зачеплення та інш.) на основі відповідних розрахункових моделей при максимальному і мінімальному навантаженні циклу і подальше урахування впливу повторних навантажень з допомогою відповідних коефіцієнтів умов роботи. Перерозподіл зусиль в процесі навантаження зв'язувався із зменшенням до зневажливо малих значень сил зачеплення і нагельного зусилля в поперечній арматурі, повною або частковою утратою зчеплення поперечної арматури з бетоном в похилій смугі. Відповідні розрахункові залежності для чотирьох класифікованих груп елементів наведені у роботі.

В рамках інженерних методів розрахунку була розроблена модифікована модель методу ферменої аналогії, який використовується у нормах Європейського комітету по бетону. Традиційна розкісна ферма розглядалась у вигляді стислого і розтягнутого поясів, що зв'язуються між собою решітчастою системою похилих бетонних армованих смуг і поперечною арматурою. Розрахунок, який виконується для кожного елемента ферми окремо, як умову силового навантаження похилих смуг розглядає осьовий стиск і зсув уздовж контакту з поясами. Граничний стан армованих смуг при цьому оцінювався на основі розробленого варіанту теорії граничного напруженого стану залізобетону. Уведені удосконалення, як було виявлено при порівнянні з дослідями, дозволили у значній мірі підвищити точність розрахунку і розповсюдити метод ферменої аналогії на розрахунок елементів без поперечного армування.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В результаті проведених досліджень розроблена теорія опору залізобетонних елементів дії поперечних сил, яка є сучасним вирішенням великої проблеми, що має важливе наукове і народногосподарське значення.

1. Узагальнені і систематизовані результати експериментальних досліджень у галузі опору елементів дії поперечних сил. Виявлені основні закономірності і дані загальні характеристики процесів утворення, розвитку і розкриття тріщин, деформування, форм

руйнування, напружено-деформованого стану, якісного і кількісного впливу на міцність, тріщинотійкість і деформативність елементів конструктивних факторів, факторів зовнішньої силової дії і стану навколишнього середовища.

2. Розроблені теоретичні основи опору, які включали класифікацію елементів по формах руйнування, класифікацію стадій напружено-деформованого стану, загальну концепцію і основоположні принципи розрахунку, що передбачали побудову розрахунків міцності, тріщинотійкості і деформативності стосовно до кожної з класифікованих груп елементів на основі відповідних фізичних і розрахункових моделей.

3. Розроблені фізичні і розрахункові моделі для можливих форм руйнування елементів в зоні дії поперечних сил: роздроблення бетону стислої зони над критичною похилою тріщиною; зрізу бетону над критичною похилою тріщиною; руйнування по похилій смузі між опорою та вантажем; руйнування по похилій смузі між похилими тріщинами. Одержані принципово нові розрахункові залежності для обчислення внутрішніх зусиль в елементах - зусилля в бетоні стислої зони над критичною похилою тріщиною, нагельного зусилля в поздовжній арматурі, сил зачеплення, граничних зусиль в похилій смузі між опорою та вантажем і між похилими тріщинами.

4. Розроблені методи розрахунку міцності елементів при можливих формах руйнування в зоні дії поперечних сил, які основані на методі граничного стану, уведені в розрахунок усіх внутрішніх зусиль, сумісному розв'язанні рівнянь рівноваги (моментів, поздовжніх і поперечних сил) і умов деформування, урахуванні впливу найбільш значущих конструктивних факторів і факторів зовнішньої дії. В рамках розроблених методів дана інтерпретація руйнування елементів по розтягнутій зоні внаслідок досягання граничного стану в поздовжній арматурі, втрати її зчеплення з бетоном і розвитку тріщини уздовж контакту стінки і полицки у двотаврових елементах.

5. Запропонована класифікація і виділені два типи тріщин в зоні дії поперечних сил - тріщини, які утворюються біля розтягнутої грані і розвиваються по траєкторії головних стискаючих напруг і тріщини, які утворюються у межах висоти елементів і розвиваються по прямолінійній траєкторії під кутом до поздовжньої осі елемента. Прийнятий єдиний критерій тріщиноутворення - досягання головними розтягуючими напруженнями на відповідних площадках по довжині заданих траєкторій граничних значень

з умови міцності бетону при плоскому напруженому стані. Розроблений метод розрахунку утворення тріщин в зоні дії поперечних сил, який базується на методі граничного стану, умові тріщиноутворення, що прийнята, урахуванні реального напружено-деформованого стану і розподілу внутрішніх зусиль в елементі.

6. Розроблений метод розрахунку ширини розкриття тріщин в зоні дії поперечних сил, який ґрунтується на: визначенні ширини розкриття тріщин як суми відносних взаємних зміщень арматури і бетону на ділянках активного зчеплення; прийнятті як розрахункових значень середнього розкриття критичної похилої тріщини в місцях перетину поперечної арматури і розкриття критичної тріщини на рівні поздовжньої арматури; виконанні розрахунку стосовно до кожної з класифікованих груп елементів на основі відповідних моделей при сумісному розв'язанні рівнянь рівноваги і умов деформування; урахуванні напружено-деформованого стану елементів і впливу найбільш значних факторів.

7. Розроблений метод розрахунку за деформаціями, в рамках якого переміщення елементів, що обумовлені деформаціями в зоні дії поперечних сил визначались на основі прийнятих фізичних і розрахункових моделей за умови рівності робіт зовнішніх і внутрішніх сил.

8. Запропоновано розв'язання ряду загальних питань теорії залізобетону. Розроблений варіант теорії граничного напруженого стану залізобетону, якісною особливістю якого є розгляд арматури, що розташована у бетонному масиві, як внутрішньої зв'язі, яка змінює напружений стан бетону при заданому зовнішньому навантаженні. Залежності, що були при цьому одержані, розповсюджені на розрахунок елементів при дії поперечних сил для випадків руйнування по похилій смугі і розрахунок елементів із скісним армуванням. Розв'язана задача опору арматурного стержня, що розташований у бетонному масиві, при поздовжньо-поперечному згині. Розглянуті можливі форми руйнування і одержані розрахункові залежності для визначення граничного навантаження на стержень для випадків досягання граничного стану у самому стержні, бетонному масиві, що його оточує, і одночасного досягання граничного стану у стержні і масиві. Теоретичні залежності, що були одержані, розповсюджені на розрахунок елементів при дії поперечних сил для визначення нагельного зусилля в поздовжній арматурі і розрахунок анкерних стержнів закладних деталей залізобетонних конструкцій.

9. Проведений комплекс цілеспрямованих експериментальних досліджень у галузі опору елементів дії поперечних сил. Одержані нові дослідні дані про опір (характер тріщиноутворення, руйнування, напружено-деформований стан, міцність, тріщиностійкість, і деформативність) елементів, які руйнуються внаслідок зрізу бетону стислої зони, елементів змінної висоти, елементів, які сприймають небагаторазове повторне навантаження. Спеціальні досліді проведені для експериментальної оцінки сил зачеплення.

10. Виконане масове порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. Для статистичної обробки були використані дані випробувань більш ніж 1000 дослідних зразків різних авторів. Виявлено, що розроблені методи розрахунку (міцності, тріщиностійкості і деформативності елементів при дії поперечних сил, анкерних стержнів закладних деталей, елементів із скісним армуванням) мають необхідну точність і вірно відображають вплив основних факторів (конструктивних і зовнішньої дії) на параметри, що визначаються розрахунком.

11. З метою практичного використання результатів роботи в рамках теорії були розроблені інженерні методи розрахунку. Розглянуте широке коло практичних розрахунків за методами, що розроблялися, - розрахунок таврових і двотаврових елементів, попередньо напружених елементів, елементів змінної висоти, розрахунок елементів при сумісній дії поперечних, поздовжніх сил та згинаючих моментів, розрахунок елементів при повторному (небагаторазово і багаторазово) навантаженні. Розроблена модифікована модель і одержані відповідні формули, які дозволяють в значній мірі підвищити точність розрахунку за методом ферменої аналогії норм Європейського комітету по бетону і розповсюдити цей метод на розрахунок елементів без поперечного армування.

12. Результати роботи одержали широке практичне упровадження - прийняті для включення в нові редакції нормативних документів Росії та України, передані до Європейського комітету по бетону, використані у практиці індивідуального та типового проектування, що дозволило одержати значний економічний ефект.

Основний зміст роботи опублікований у монографії:

Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных элементов при действии поперечных сил. - Киев, Будівельник, 1989. - 105 с. і більш ніж 25 статтях автора, серед яких основними є такі:

1. Поляков Л.П., Климов Ю.А. Прочность железобетонных балок переменной высоты по наклонным сечениям // Исследования работы мостовых конструкций. Труды МИИТ, вып. 650. - М.: 1979. - С. 37-49.

2. Поляков Л.П., Климов Ю.А., Залесов А.С. К расчету балок переменной высоты // Бетон и железобетон, 1980. - № 8. - С.24-25.

3. Климов Ю.А. Расчет прочности балок переменной высоты по наклонным сечениям // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1980. - № 1. - С. 127-131.

4. Климов Ю.А. Экспериментально-теоретические исследования прочности железобетонных балок переменной высоты по наклонным сечениям // Деп. рукопись. - Киев, УкрНИИТИ, - 1980. - № 2118 ДР. - 22 с.

5. Климов Ю.А. Напряженное состояние железобетонных элементов с переменной высотой сечения в зоне действия поперечных сил // Расчет пространственных строительных конструкций. Межвузовский сборник. - Куйбышев. - 1981. - С. 159-163.

6. Климов Ю.А. К вопросу об усовершенствовании расчета по СНиП П-21-75 прочности элементов переменной высоты по наклонным сечениям // Деп. рукопись. - ВНИИС. - 1985. - № 5273. - 15 с.

7. Залесов А.С., Климов Ю.А. Развитие физической модели работы железобетонного элемента при действии поперечных сил с учетом условий деформирования // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. - М.: НИИЖБ. - 1986. - С. 92-105.

8. Барашиков А.Я., Климов Ю.А., Аллабердиев Р.Д. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных элементов при повторных нагружениях поперечными силами // Работа бетона и железобетона с различными видами армирования на выносливость при многократно повторяющихся нагрузках. Тезисы докладов Всесоюзного координационного совещания. - Львов, - 1987. - С. 8.

9. Климов Ю.А. К расчету сжато-изогнутых железобетонных элементов // Строительные конструкции, вып. 40. - Киев: Будівельник, - 1987. - С. 89-91.

10. Климов Ю.А. Расчет прочности элементов при действии поперечных сил // Бетон и железобетон. 1988. - № 4. - С. 33-35.

11. Баршиков А.Я., Климов Ю.А., Яковец А.В. Работа трехшарнирных рам при переменных длительных нагрузках эксплуатационного уровня // Бетон и железобетон, 1989. - № 1. - С. 8-10.

12. Климов Ю.А. Внутренние усилия в наклонном сечении на стадии разрушения // Исследования работы и совершенствование методов расчета железобетонных конструкций. Материалы конференции. - Львов, 1989. - С. 56-57.

13. Юсупов З.Ю., Климов Ю.А., Аллабердиев Р.Д. Работа изгибаемых элементов по наклонным сечениям при многократно повторных нагружениях поперечными силами // Охрана окружающей среды и исследование промышленных отходов. Сборник научных трудов. - Фергана. - 1989. - С. 85-89.

14. Климов Ю.А., Яковец А.В. Расчет ширины раскрытия трещин в высоких железобетонных балках // Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций и их внедрение в строительную практику. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Полтава. - 1989. - С. 93-94.

15. Климов Ю.А., Жеребец В.Б. Теория пластичности в расчетах прочности железобетонных конструкций // Материалы УІ Национального конгресса по теоретической и прикладной механике. - Варна. - 1989.

16. Мурашко Л.В., Климов Ю.А., Муаяд М.К. Экспериментальные исследования многослойных балок с наружными слоями из армированного базальтобетона // Деп. рукопись. - Киев, УкрНИИТИ. - 1989. - № 1584. - 20 с.

17. Климов Ю.А. Внутренние усилия в наклонном сечении при расчете прочности железобетонных элементов // Бетон и железобетон, 1990. - № 1. - С. 16-18.

Подп. к печ. *15. 10. 82* . Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. № 3
Печать офсетная. Усл. печ. л. *200* . Усл. кр.-отт. *243* .
Уч.-изд. л. *10* . Тираж *100*
Зак. № *2-7712* . Бесплатно.

РАПО «Укрвизполиграф».
252151, г. Киев, ул. Вольнская, 60.

30

Безплатно

Ав 26.242

АВ 26.242