

УДК 624.012.45

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДУЛЯ ЗСУВУ БЕТОНУ
З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙ ПЛАСТИЧНОСТІ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯ СДВИГА
БЕТОНА С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF CONCRETE SHEAR MODULUS TAKING
INTO ACCOUNT PLASTIC DEFORMATION**

Азізов Т.Н., д.т.н., професор, **Вільданова Н.Р.**, асп. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Азизов Т.Н., д.т.н., профессор, **Вильданова Н.Р.**, асп. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Azizov T.N., doctor of technical sciences, professor, **Vildanova N.R.**, postgraduate student (Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa)

В результаті експериментальних випробувань бетонних стрижнів кільцевого перерізу при чистому крученні за отриманими в лабораторних умовах параметричними точками побудовано діаграму зсуву бетону.

В результате экспериментальных испытаний бетонных стержней кольцевого сечения при чистом кручении по полученным в лабораторных условиях параметрическими точками построена диаграмма сдвига бетона.

The parametric points of the stress-strain diagram for the concrete in pure torsion have been defined in the course of the tests of the concrete cylinders under laboratory conditions.

Ключові слова:

Бетон, діаграма, зсув, кручення, жорсткість, деформації, пластичність.

Бетон, диаграмма, сдвиг, кручение, жесткость, деформации, пластичность

Concrete, chart, shear, torsion, stiffness, deformation, plasticity

Сучасні реалії будівництва вимагають постійного підвищення стандартів проектування залізобетонних конструкцій, що впливає на техніко-економічні показники, міцнісно-деформативні характеристики матеріалів, на підвищення

якості робіт інженерів і виконавців, прийняття до уваги додаткових факторів, які позначаються на роботі конструкції. У багатьох працях [1-14] доведена важливість дослідження крутильної жорсткості елементів, оскільки перерозподіл зусиль у багаторазово статично невизначених системах залежить як від згинальної, так і від крутильної жорсткості елементів.

Останні дослідження просторової роботи конструкцій [1-8] вже дозволяють ввести до практики проектування врахування впливу фактора крутильної жорсткості залізобетонних елементів, яка має бути визначена при розрахунку систем, що деформуються просторово, оскільки такі конструкції вимушені опиратись дії не лише згину і стиску, але і кручення (наприклад, при будь-якому несиметричному завантаженні елементів просторових конструкцій перехресно-ребристих систем, прольотних будов мостів і перекриттів, при впливі характеру розподілу зусиль перекриттів на бортові балки тощо). У вищезазначених дослідженнях обґрунтовано значну ступінь впливу крутильної жорсткості на просторову роботу залізобетонних прогонових будов мостів і перекриттів будівель, незалежно від наявності чи відсутності різного роду тріщин. Вчені вивчали і розробляли розрахункові методики визначення крутильної жорсткості залізобетонних елементів з нормальними тріщинами в умовах чистого кручення та згину з крученням для елементів різної форми поперечного перерізу [1-8], досліджуючи вплив змінення геометрії перерізу внаслідок утворення тріщин на напружено-деформований стан конструкції, і вивели ряд спеціальних формул для визначення крутильної жорсткості у різних вищезазначених випадках (оскільки відомі формули опору матеріалів не дозволяють обчислити момент інерції залізобетонного перерізу з тріщиною в розтягнутій зоні). При цьому модуль деформацій другого роду G , як множник в добутку GI , визначався за теоретичною залежністю від модуля пружності бетону E .

Відтак, до сьогодні вплив січного модуля зсуву бетону на крутильну жорсткість не приймалась до уваги, хоча дослідження цього впливу важливе не лише у контексті вищезазначених вишукувань, але і можуть позитивно позначитись на економії матеріалів, ще більше підвищити точність розрахунків за методиками в рамках теорії просторової роботи перекриттів.

Тому **метою роботи** є дослідження повної діаграми зсуву бетону на основі експериментальних і теоретичних вишукувань, проведених авторами в лабораторних умовах.

Змінення згинальної жорсткості EI в залежності від рівня напружень, відповідно до деформування матеріалу на різних ділянках діаграми стиску-розтягу, враховується сучасними програмними комплексами; зменшення крутильної жорсткості через розвиток деформацій зсуву не приймається до уваги через відсутність достатньої експериментальної бази, що підтверджувала би теоретичну методику [14]. Саме цим і зумовлена **актуальність досліджень**, що вплив безпосередньо змінення модуля зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності на крутильну жорсткість

залізобетонних конструкцій при їх просторовій роботі не враховується у методиках проектування через брак експериментальних даних про діаграму деформування бетону при чистому крученні.

Новизна полягає в дослідженні безпосереднього впливу зміни модуля зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності на крутильну жорсткість конструкцій, що дозволить використовувати більш точну діаграму роботи бетону при зсуві у практичних розрахунках, підвищуючи точність і економічність проектів.

При наукових дослідженнях і практичних розрахунках слід спиратись на діаграму зсуву бетону, оскільки крутильна жорсткість іноді зазнає значного впливу від змінення січного модуля зсуву при підвищенні рівня внутрішніх дотичних напружень залізобетонного елемента при короткочасній дії одноразово прикладеного навантаження до граничних руйнуючих значень (рис. 1).

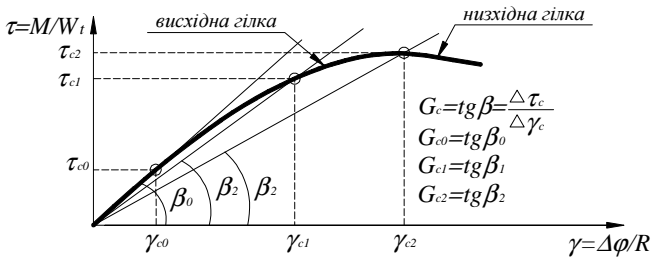


Рис. 1 Загальний вигляд деформування бетону при чистому короткочасному крученні

Вирішення задачі дослідження діаграми зсуву бетону у теорії запропоновано О.Ф.Яременком [14] і базується на теорії деформацій пружньопластичності, за якою інтенсивність напружень пов'язана з інтенсивністю деформацій однією і тією ж залежністю для всіх видів напружених станів. За теоретичною методикою дотичні напруження τ пов'язані з кутовими деформаціями γ залежністю

$$\tau_c = G_c \gamma_c = \frac{E_c^0 \vartheta_c}{2(1 + \mu_c)} \gamma_c, \quad (1)$$

де τ_c – дотичні напруження; γ_c – кутові деформації; G_c – модуль пружності бетону другого роду; E_c^0 – початковий модуль деформацій бетону; ϑ_c – коефіцієнт зміни січного модуля пружності при зсуві, визначається за; μ_c – коефіцієнт Пуасона для бетону.

Для прикладу можна розглянути діаграму зсуву бетону одного класу при різних значеннях модуля деформацій. Так, на рис.2 наведено розрахунок залежності кутів повороту від дотичних напружень для важкого і

дрібнозернистого бетону класу В20 за СНиП, або С16/20 за ДБН (модуль пружності дрібнозернистого бетону на 20% нижчий за модуль пружності важкого бетону).

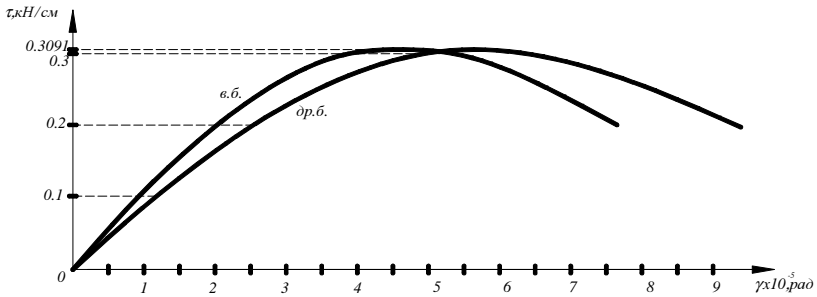


Рис.2 Теоретична діаграма зсуву важкого і дрібнозернистого бетонів В20

Граничне дотичне напруження прийнято рівним міцності бетону при зсуві:

$$\bar{\tau}_c = f_{c,sh} = 0.7\sqrt{f_{ck}f_{ctk}} \quad (2)$$

Модуль деформацій бетону E_c^0 для важкого бетону складає 2700 кН/см², для дрібнозернистого – 2200 кН/см². Граничне дотичне напруження $\bar{\tau}_c$ залежить від міцнісних характеристик бетону, які є рівними для різного виду бетону одного класу, внаслідок чого графік з меншим модулем пружності «розтягується», тобто дрібнозернистий бетон відрізняються від важкого деформаційними характеристиками. Графіки наочно демонструють, що чим вище модуль деформації, тим менше деформується матеріал внаслідок розвитку внутрішніх напружень, при цьому рівень граничних напружень, за теорією, залишається однаковим.

Наукові вишукування і чисельні експерименти з дослідження деформаційної залежності при крученні вимагають експериментального підтвердження для можливості подальших коректних досліджень і розвитку достотних методик при дослідженні крутильної жорсткості. Але **експериментальні дослідження** повної діаграми зсуву бетону не проводились через складність отримання параметричних точок низхідної гілки і необхідність застосування спеціальних приладів. Сутність процедури отримання повної діаграми зсуву і стиску бетону єдина. Складність полягає в експериментальному визначенні параметричних точок низхідної гілки діаграми після проходження пікової точки напружень: внаслідок раптового руйнування зразку дослідження низхідної гілки стає неможливим без спеціального обладнання. Причина у тому, що традиційні преси при випробуваннях за умови рівномірного прирощення навантаження при

досягненні максимальної точки діаграми деформування, що відповідає границі короткочасної міцності, накопичують значну потенційну енергію деформації, яка миттєво реалізується в енергію удару. У роботі [10] наведена і детально описана раціональна і проста методика отримання параметричних точок повної діаграми зсуву бетону при крученні, за аналогією з подібною схемою отримання повної діаграми деформування бетону при стиску [9], на відміну від складної традиційної методики, яка передбачає застосування додаткових сталевих циліндрів і колон для прийняття на себе ударного навантаження після досягнення бетоном границі короткочасної міцності. Суть методики [10] полягає у використанні траверси, що сприймає навантаження, для контрольованої передачі зусиль на бетонний зразок. На рис.3 наведена схема, за якою було сконструйовано установку для отримання повної діаграми бетону за чистого кручення.

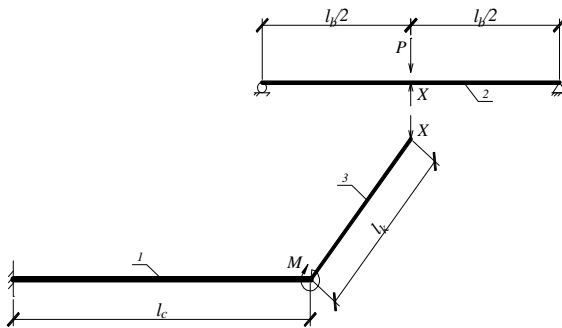


Рис. 3 Схема зусиль у статично невизначеній системі «траверса-зразок, який випробується на кручення»

Умовні позначення:

- 1 – бетонний зразок (циліндр-вісімка);
- 2 – траверса, за допомогою якої контролюється зусилля на циліндр;
- 3 – важіль для створення необхідного крутильного моменту на «вісімку»;
- P – сила, прикладена до траверси;
- X – сила, що передається на бетонний циліндр через важіль 3;
- M – крутильний момент, який сприймає досліджуванний зразок.

Переваги даного способу отримання параметричних точок діаграми зсуву бетону забезпечені завдяки сумісній деформації зразка з траверсою від самого початку завантаження до його повного руйнування і відсутності необхідності втручання у процес випробування, що дозволяє отримати чіткі значення точок діаграм $M_t-\varphi$ і, відповідно, $\tau-\gamma$ уникаючи похибок системи «експериментатор – дослідний зразок». Також слід зазначити, що конструювати установку можна з використанням двох перехресних траверс з металу, пластика тощо задля зручності і забезпечення підбору характеристик її елементів за будь-яких співвідношень їх деформативності і міцності.

Для порівняння теоретичних досліджень з експериментом за вищезазначеною методикою була розрахована залежність кута зсуву від дотичних напружень. Детальний опис геометричних параметрів зразку і фізико-механічних характеристик бетону (що відповідають класу бетону С16/20) наведені у роботі [11]. Наведемо обидві залежності τ - γ : розраховану теоретично з використанням нормативних фізико-механічних характеристик і отриману у ході зазначеного експерименту, а також середні значення експериментально отриманих параметричних точок.

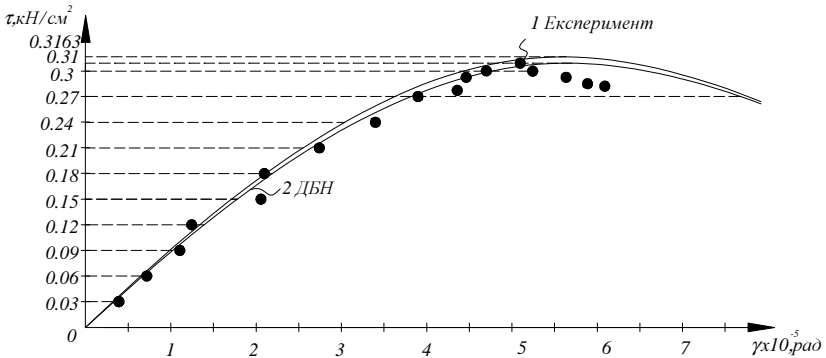


Рис. 4 Порівняння теоретичної діаграми кручення бетону з експериментальною

Низхідна гілка діаграми τ - γ , за результатами експерименту, значно коротша за низхідну гілку діаграми σ - ϵ при стиску. Це пов'язано з тим, що бетонний зразок руйнується від дії розтягуючих напружень. Аналогію можна прослідити у «розтягнутій» частині діаграми σ - ϵ , де низхідна її частина значно коротша. При дослідженні кручення слід розглядати його як складний напружено деформований стан, при якому внутрішні зусилля розвиваються не лише у площині одного перерізу, як ідеалізовано уявляється при зсуві. У прилягаючих волокнах під кутом 45° розвиваються і стиск з розтягом у протилежних частинах перерізу, тому відбуваються і зім'яття бетону від стиску, і виникнення тріщини від розтягуючих напружень за межею міцності матеріалу.

За допомогою **кореляційного відношення** η визначено ступінь відповідності отриманого числовою інтерполяцією для значень дотичних напружень τ кривих, побудованих за теоретичними і експериментальними даними. Величина кореляційного відношення $\eta=0,984$ свідчить про високу ступінь імовірності наближення значення γ , апроксимованого за експериментальними даними, і теоретичного значення, визначеного за методикою [14], а також про достатню ступінь точності як розробленої теоретичної методики розрахунку повної діаграми зсуву бетону, так і дієвість

експериментальної установки, запропонованої авторами.

Висновки і перспективи досліджень.

1. В результаті експериментального дослідження бетонних стрижнів кільцевого перерізу за отриманими в лабораторних умовах параметричними точками побудовано діаграму зсуву бетону.

2. Кореляційне відношення, яке визначає ступінь відповідності нелінійного зв'язку експериментальної діаграми з теоретично встановленою залежністю, близький до одиниці, що підтверджує як чистоту і коректність експерименту, так і про достовірність і обґрунтовану методику теоретичної діаграми.

3. Аналіз діаграми на даному етапі досліджень свідчить про необхідність обмеження кутових деформацій γ .

1. Азизов Т.Н. Теория пространственной работы перекрытий. – Киев: Науковий світ, 2001. – 276 с. 2. Азизов Т.Н. Расчет железобетонных перекрытий и пролётных строений мостов. – Одесса: ОГАСА, 2009. – 192с. 3. Азизов Т.Н. Определение крутильной жесткости железобетонных элементов с трещинами// Дороги і мости. Збірник наукових праць. Вип. 7. Том 1. – Київ: ДерждорНДІ, 2007. – С.3-8. 4. Азизов Т.Н. Пространственный расчёт железобетонных пролётных строений мостов// Дороги і мости. Збірник наукових праць. Вип. 7. Том 1. – Київ: ДерждорНДІ, 2007. – С. 8-21. 5. Азизов Т.Н. Общий подход к определению крутильной жесткости железобетонных элементов с трещинами//Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 17., – Рівне: Нац. ун-т водного господарства та природокористування, 2008. – С. 92-99. 6. Азизов Т.Н. Жесткость железобетонных элементов при кручении и ее влияние на пространственную работу мостов// Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій// Збірник наукових праць. НАН України. Фізико-мех.інститут ім. В.Г.Карпенка. – Львів, 2009. – С. 576-590. 7. Азизов Т.Н., Парамонов Д.Ю. Расчет прочности при кручении железобетонных элементов с нормальными трещинами с применением диаграммы деформирования бетона// Проблемы современного бетона и железобетона. Матер. III международного симпозиума (Минск, 9-11.11.2011). Том. 1. – С. 20-24. 8. Азизов Т.Н., Яшук С.М., Срібняк Н.М. Розрахунок просторово деформуючихся систем з урахуванням зміни крутильних і згинальних жорсткостей їх елементів// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 18. – Рівне: Нац. ун-т водного господарства та природокористування, 2009. – С. 106-111. 9. Азизов Т.Н. Способ построения диаграмм состояния бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 28 – Одеса: ОДАБА, 2007. – С. 3-8. 10. Азизов Т.Н., Вильданова Н.Р. Экспериментальное определение нелинейной диаграммы сдвига бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 46 – Одеса: ОДАБА, 2012. – С. 3-8. 11. Азизов Т.Н., Вильданова Н.Р. Експериментальне дослідження діаграми зсуву бетону // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 50 – Одеса: ОДАБА, 2013. – С. 3-8. 12. Залесов А.С. Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций методом конечных элементов. – М.: ЦПП, 2008. – 20с. 13. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с. 14. Яременко О.Ф. Несуча здатність та деформативність залізобетонних стержневих елементів в складному напруженому стані / О.Ф.Яременко, Ю.О. Школа. – Одеса: ОДАБА, 2010. – 136с.

