

ресурс]. – Режим доступа : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-п>.

4. Об отходах: Закон Украины от 16.10.2012 г. № 5456-VI [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр>.

5. Об утверждении Методических рекомендаций по организации сбора, перевозки, переработки и утилизации бытовых отходов : Приказ от 7 июня 2010 года № 176 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN56273.html. 6. Об альтернативных видах топлива : Закон Украины от 19 июня 2012 года № 4970-VI [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1391-14>.

УДК 624.012

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Худобич А.О.

Науковий керівник – д.т.н., проф. Картюк В.М.

Моделювання напружено-деформованого стану нормальних перерізів плоско навантажених залізобетонних елементів у дискретному виді здійснювали за шаруватою деформаційною моделлю згідно з рекомендаціями М.І.Карпенка [1] та З.Я.Бліхарського [2] за стандартною процедурою. Воно дозволило з достатньою для практичних розрахунків точністю відтворити або спрогнозувати тріщиностійкість, деформативність та міцність окремих нормальних перерізів дослідних елементів.

Моделювання складного напружено-деформованого стану прогінних залізобетонних конструкцій шляхом нелінійних скінчено-елементних розрахунків дозволяє чисельно відтворити його без значних матеріально-технічних затрат на проведення натурних експериментів, що зумовлює **актуальність** таких досліджень.

Шаруваті деформаційні моделі плоско навантажених, залізобетонних балок за I; ,III, А, Б, В, Г; IV; V і VI серіями дослідів та відповідні блок-схеми розрахунків опубліковані в роботах [3-8].

Ураховуючи симетрію дослідних елементів, вказані розрахунки здійснювали тільки однієї половини балки. Її умовно розбивали на

об'ємні восьмивузлові ізопараметричні скінчені елементи №236 з розмірами $1x1x1\text{см}$ для зручності моделювання арматури, а також у зв'язку з тим, що в якості крупного заповнювача був використаний гранітний щебінь фракції 5...10мм.

У розрахунках застосовували кроковий та кроково-ітераційний методи з використанням кусочно-лінійної залежності №14 бібліотеки з відповідним алгоритмом.

Методика і основні результати моделювання складнонавантажених дослідних елементів з використанням ПК «Лира 9.6» опубліковані в роботах [11].

Мета даної роботи – чисельно відтворити результати складного напружено-деформованого стану та міцності прогінних залізобетонних конструкцій.

Задачі досліджень – моделювання напружено-деформованого стану дослідних елементів, в цілому, з урахуванням пропорційно зростаючого навантаження повздовжніми і поперечними силами, згинальним та крутним моментами шляхом нелінійного скінчено-елементного розрахунку у ПК «Лира» з використанням реальних діаграм стану матеріалів та феноменологічних критеріїв їх міцності.

Модель напружено-деформованого стану залізобетонного елемента поєднує в собі моделі деформування вихідних матеріалів. Тому розрахункові моделі напружено-деформованого стану залізобетонного елемента до теперішнього часу базуються на принципі феноменологічного аспекту механічної теорії поведінки залізобетону як композитного матеріалу.

Для характеристики арматурної сталі на розтяг застосовують "умовну" та "істинну" діаграми стану. У першому випадку напруження в арматурі обчислюється у припущенні незмінності початкової площі поперечного перерізу; у другому випадку дотримуються припущення про функціональну залежність напружень від фактичної площі поперечного перерізу, яка зменшується у процесі деформування. Виходячи з того, що у реальних дослідах залізобетонними елементами граничні деформації низьковуглецевих ("м'яких") сталей рідко перевищують 2...3%, тому при розрахунках залізобетонних конструкцій, армованих сталевими стержнями з явно вираженими ділянками текучості, застосовують першу ("умовну") модель. Другу модель низьколегованих ("твердих") сталей класів А IV (А 600), А- V (А-800), А -VI (А 1000) ототожнюють з діаграмами деформацій без ділянки текучості. Основні характеристики деформування вказаних сталей нормовані.

Моделі деформування арматурних сталей у межах від $\sigma_s=0$ до σ_{sl} утворюються, як правило, декількома з'єднаннями у вигляді $\sigma_s=f(\epsilon_s)$,

найбільш відомі серед яких [12-15] та ін.

Перевагами цих сучасних моделей-апроксимацій діаграм деформування арматури є урахування межі міцності, що дозволяє за допомогою розрахунків попередити розрив арматури при руйнуванні нормального чи похилого перерізу елемента. Діаграму стану арматурних сталей з фізичною межею текучості апроксимують моделлю з трьома прямими ділянками або двома у вигляді діаграми Прандтля. При моделюванні роботи арматурних стержнів зі сталей з умовною межею текучості діаграми стану арматури представляють складеними з прямої і криволінійної ділянок, двох або трьох прямолінійних ділянок [99].

Вдосконалення теорії розрахунку складного напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій у значній мірі пов'язане з деформуванням такого структурно неоднорідного матеріалу як бетон. На цю проблему дослідники звертали увагу ще з встановлення факту фізичної нелінійності деформування бетону [10], [17], [9].

Вивченню фізичної нелінійності бетону та залізобетону присвячені піонерні розробки А. Ф. Лолейта, [18], В. І. Мурашева [19].

Вони створили передумови для розвитку інженерних методів розрахунку залізобетонних конструкцій, що згинаються, та знайшли відображення у багатьох нормативних документах. Проте, ці теорії дають відповідь про характер розподілу напружень по висоті перерізу елементів тільки на окремих стадіях їхньої роботи й не дозволяють простежити за дійсним напружено-деформованим станом аж до появи граничного стану. При цьому, за допомогою розрахунку можна зробити прогноз, в основному, тільки нормальних напружень та відповідних деформацій вздовж осі стержня.

Для того, щоби повністю охарактеризувати процес деформування дослідних залізобетонних елементів потрібно, як виявилось, застосувати теорію пластичності, методи механіки деформування та руйнування твердого тіла.

Початок дослідженням пластичності матеріалів при складному напружено-деформованому стані покладено роботами L. Prandtl [20], Рейсса [21], та ін. Проте, досить швидко виявилася непридатність вказаних класичних теорій для описання пластичності бетону, оскільки бетон має різну міцність на стиск і розтяг, в ньому можуть утворюватися тріщини, що визиває появу деформаційної анізотропії та ефект дилатації при триосьовому стиску, тобто збільшення об'єму наперекір класичній гіпотезі.

Г. О. Генієв, В. М. Киссюк, Г. О. Тюпін [11] вперше запропонували урахувати всі перераховані вище особливості деформування бетону,

який розглядається як нелінійно-пружний ізотропний матеріал, а залізобетон – трансверсально ізотропним як до, так і після утворення тріщин.

Аналіз різних праць показав, що як ортотропна, так і анізотропна теорії малих пружно-пластичних деформацій бетону, по суті, являються деформаційними теоріями, що оперують скінченими величинами деформацій та напружень. І якщо вони добре узгоджуються з дослідом при простому пропорційному навантаженні, то при складному режимі навантаження розрахункові і фактичні деформації та напруження суттєво відрізняються одне від одного [20].

Відносно недавно виявилось, що напруження і деформації при розвантаженні та повторному навантаженні, температурних впливах тощо задовільно можуть бути пов'язані між собою тільки на базі теорії течії з урахуванням їхніх приростів.

Прирости деформацій утворені з пружної (оборотної) та пластичної (необоротної) складових. При цьому, пластична складова приростів деформацій та напружень згідно з цією теорією може бути охарактеризована деякою поверхнею, яку називають поверхнею навантажень або поверхнею пластичного потенціалу. Пластична течія розвивається по нормалі до цієї поверхні (асоційована теорія) або з відхиленням від нормалі (неасоційована теорія). Як з'ясувалося, ці поверхні будуються на базі граничних поверхонь матеріалу шляхом їхньої трансформації (деформаційне зміцнення) або зміцнення (трансляційне зміцнення). Різні варіанти теорії течії відрізняються способом побудови цих поверхонь.

Теорії течії, які можна було б застосувати до розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій, розвинуті значно менше у порівнянні з деформаційними. Як з'ясувалося, сучасні варіанти і деформаційної теорії, і теорії течії базуються на граничних поверхнях матеріалу, які описують міцність бетону та залізобетону при складному (тривісному) напруженому стані. У деформаційній теорії вказані поверхні визначають параметри нелінійності, а у теоріях течії вони використовуються для побудови поверхонь навантаження, пластичного потенціалу тощо.

Поява сучасних високопродуктивних ЕОМ з великим об'ємом пам'яті зробила можливим розв'язання задач зі складним розрахунковими моделями числовими методами. У такій ситуації головним постає питання про вибір ефективного числового методу. На сьогоднішній день метод скінчених елементів (МСЕ) зайняв провідне місце завдяки своїм очевидними перевагами, можливості приведення задачі до системи лінійних або нелінійних алгебраїчних рівнянь без попереднього

формулювання їхніх диференційних аналогів, уявної розбивки суцільного середовища конструкції на ряд елементів, які зберігають її властивості.

У роботі D. Ngo і A.C. Scordelis вперше застосували МСЕ для розрахунку конструкцій, які працювали в умовах плоского напруженого стану. У теперішній час у більшості числових досліджень за пропозицією О. О. Гвоздева та М. І. Карпенка для дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій використовуються однотипні скінчені елементи, утворені комплексним, нелінійним, анізотропним композиційним матеріалом, який складається з двох суцільних середовищ – бетону й „розмазанної” за допомогою коефіцієнта армування арматури.

Найбільші успіхи у моделюванні роботи залізобетону з тріщинами на основі МСЕ були досягнуті дослідниками при використанні теорії М. І. Карпенка [1], для випадку складного напруженого стану, і яка пройшла широку апробацію у вітчизняних програмних комплексах.

Найбільшого значення проблема фізичної нелінійності деформування бетону набула у задачах з неоднорівним напруженим станом, оскільки за таких умов роботи бетону фізична нелінійність в ньому проявляється на усіх етапах деформування [1], зростаючи з наближенням до граничної поверхні руйнування. Найчастіше таке явище спостерігається у складно завантажених залізобетонних елементах. На початковій стадії розвитку теорії спроби урахувати нелінійність деформування бетону здійснювалися з використанням класичних теорій пластичності (малих пружно-пластичних деформацій). Робота бетону характеризувалася за допомогою відомих гіпотез ізотропності матеріалу в процесі деформування і пружності зміни об'єму. Тобто, вважалось, що деформація розвивається тільки за рахунок зміни форми, зумовленою компонентами девіаторів напружень D_1, D_2 феноменологічного критерію у вигляді функціональної залежності між першим інваріантом тензора напружень J_1 , відміченими девіаторами напружень і характеристикою матеріалу R у вигляді $F(J_1, D_1, D_2, R) = 0$ або у вигляді функціональної залежності між октаедричними нормальними σ_0 та дотичними τ_0 напруженнями і параметром $\mu\sigma$ Лоде-Надаї [1]:

$$F(\tau_0, \sigma_0, \mu\sigma, R) = 0 \quad (1)$$

При застосуванні вказані в [11] передумови експериментально не підтвердилися і, як відмічено у роботі [10], навіть при низьких рівнях напружень об'єм бетону нелінійно зменшується, а при високих рівнях напружень, що близькі до руйнівних, збільшується також за нелінійним законом. Фізична суть відкритого ефекту деформування – явище утворення мікротріщин відриву між композитами бетону. М. І. Карпенко показав, при цьому, що даний процес тріщиноутворення

носити направлений характер, внаслідок чого проявляється анізотропія бетону.

Моделювання механізму деформування стиснутого бетону з урахуванням ефекта дилатації здійснюється за трьома теоретичними напрямками установлення нелінійних зв'язків між σ_b - ϵ_b . Вони визначаються за конкретними умовами задачі та базуються на таких концепціях:

- модифіковані передумови теорії малих пружнопластичних деформацій [11];
- представлення бетону як нелінійно деформівного матеріалу з набуттям властивостей ортотропії [9], [1];
- застосування модифікованих передумов теорії текучості [1].

З числа трьох названих концепцій чи теорій моделювання механізму деформування стиснутого бетону найменшого розповсюдження набула остання третя концепція. Пояснення цьому – відсутність переконливих експериментальних даних, які могли б підтвердити за даною концепцією стосовно бетону теоретичні гіпотези можливості урахування нелінійності зміни об'єму і ефекту дилатації, коли пластичність бетону вже неможливо асоціювати з поверхнею текучості законом ортогональності та постулатом Друкера.

Проведені дослідження за даною теорією дозволяють зробити висновок про те, що розвиток третьої концепції має непогані перспективи для характеристики явищ деформування бетону в умовах складних режимів навантаження. Для практичного застосування найбільшого розповсюдження набули перші дві концепції. Так, для задач визначення механізму прогресуючого руйнування бетону за допомогою оптимізаційних апроксимацій σ_b - ϵ_b шляхом урахування явища деформування бетону за спадною гілкою діаграми його стану найбільш прийнятною для використання на практиці є перша концепція.

Ця концепція приваблива своєю простотою при побудові функції $\sigma_b = f(\epsilon_b)$ при умові ізотропності матеріалу та функціональній залежності модуля бетону від його НДС з одночасним урахуванням ефекту дилатації, рівномірно розподіленою по всьому об'ємі (у вигляді утворення рівномірно розподілених по всьому об'єму тріщин відриву між композитами) модулем дилатації.

Друга концепція переважно розроблялася в НДІЗБ під керівництвом О. О. Гвоздева. Її сутність – вдосконалення теорії А. А. Гльюшина у напрямку можливості розвитку деформаційної анізотропії в процесі деформування бетону. Виходячи з того, що фізичні співвідношення механізму деформування у цій концепції моделювання як для ортотропного матеріалу з направленим розвитком ефекту дилатації [1] та

урахуванням неоднорідності деформування бетону при розтязі та стиску із залученням значної кількості фізичних величин. Через відносну складність дана концепція набула широкого застосування при відображенні реального характеру механізму деформування бетону в умовах його об'ємного напруженого стану. Не зважаючи на складність математичного представлення, перевага даної ортотропної концепції перед іншими полягає у можливості, з достатньою вірогідністю відобразити реальний характер деформування бетону залізобетонного елемента за допомогою спеціальних розрахункових програм на ЕОМ.

Висновки

Моделювання складного напружено-деформованого стану дослідних конструкцій шляхом нелінійних скінчено-елементних розрахунків за допомогою апробованих програмних комплексів («Лира 9.6», «Лира САПР», «ANSYS MECHANICAL») дає можливість чисельно відтворити результати експерименту та зробити достовірний прогноз, насамперед, їх міцності.

Розв'язані дослідницькі та доведені до рівня практичного використання розрахункові моделі та загальний інженерний метод розрахунку дозволяють надійно моделювати складний напружено-деформований стан і прогнозувати несучу здатність приопорних ділянок прогінних залізобетонних конструкцій з урахуванням будь-якої комбінації конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії.

Література

1. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Кукунаев В. С. Механическая модель железобетонных плит различной толщины с трещинами / Владимир Сергеевич Кукунаев. – Симферополь : ООО Издательство "Сталь", 2008. – 177 с.
3. Дорофеев В. С. Розрахунок міцності нерозрізних балок з використанням деформаційної моделі / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська // Зб. наук. праць "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій" : [за загал. ред. Й. Й. Лучка]. – Львів : Каменяр, 2007. – Вип. 7. – С. 223–237.
4. Дорофеев В. С. Тріщиностійкість нерозрізних балок / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська // Вісник нац. університету "Львівська політехніка." – № 600 "Теорія и практика будівництва" : [за загал. ред. З. Я. Бліхарського]. – Львів : "Львівська політехніка", 2007. – С. 92–100.
5. Дорофеев В. С. Моделирование напряженно-деформированного

состояния железобетонной элементов при продольно–поперечном изгибе / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, К. И. Артюшкина и др. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ТОВ "Зовнішрекламсервіс", 2008. – Вип. 28, часть 2. – С. 137–148.

6. Дорофеев В. С. Моделирование напряженно–деформированного состояния железобетонной элементов при продольно–поперечном изгибе с учетом длительного действия нагрузки / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, С. Ф. Неутов и др. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ТОВ "Зовнішрекламсервіс", 2008. – Вип. 30. – С. 67–80.

7. Дорофеев В. С. Моделирование напряжено–деформованого стану таврових попередньо напружених залізобетонних балок, що використовуються в агропромисловому будівництві / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Ф. Р. Карп'юк // Матеріали Міжнародного наукового форуму ["Економічні, технологічні та соціально–економічні аспекти ефективного використання матеріально–технічної бази АПК"] (вересень 2008 р.). – Львів : Львівський агроуніверситет, 2008. – С. 522–530.

8. Дорофеев В. С. Міцність приопорних ділянок позациентровано стиснутих або розтягнутих прогінних залізобетонних елементів / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, М. М. Петров // Вісник нац. університету "Львівська політехніка". – № 662 "Теорія і практика будівництва" : [за ред. З. Я. Бліхарського]. – Львів : "Львівська політехніка", 2010. – С. 160–168.

9. Карпенко Н. И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона / Н. И. Карпенко // Строительные конструкции : Сб. научн. тр. – Минск, 1983. – С. 164–173.

10. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М. : Стройиздат, 1949. – 248 с.

11. Гениев Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. – М. : Стройиздат, 1974. – 316 с.

12. EN 1992 – 1: 2001 (Final Draft, Fpril, 2002) Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1 General Rules and Rules for Buildings. – Final Draft. December, 2004. – 230 p.

13. Practical design of reinforced and prestressed concrete structures based on the CEB–FIP mode code (MC–78). – London : Thomas Telford Limited, 1984. – 36 p.

14. Мадатян С. А. Расчет деформаций изгибаемых железобетонных элементов при работе арматуры в упруго–пластичной стадии / С. А. Мадатян, Б. П. Горячев // Предельные состояния элементов

железобетонных конструкций. – М. : Стройиздат, 1976. – С. 132–137.

15. Семенов А. И. Предварительно напряженный железобетон с витой проволочной арматурой / А. И. Семенов. – М. : Стройиздат, 1976. – 208 с.

16. Расчет конструкций на динамические и специальные загрузки [Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев.]. – М. : Высшая школа, 1992. – 319 с. – (Учебное пособие для вузов по специальности "Промышленное и гражданское строительство").

17. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Стройиздат, 1961. – 96 с.

18. Лолейт А. Ф. Новый проект Норм : тр. конф. по материалам I Всесоюзной конференции по бетону и железобетону (Москва, апрель 1930 г.) / А. Ф. Лолейт. – М., 1931.

19. Мурашев В. И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона (Основы сопротивления железобетона) / Василий Иванович Мурашев. – М. : Министерство строительства предприятий машиностроения, 1950. – 268 с.

20. Prandtl L. Spannungsverteilung in Plastischen Korpern : Proc. of 1 st Int. Congr. of Appl. Mech / L. Prandtl – 1924. – P. 43–54.

21. Рейсс Э. Учет упругой деформации в теории пластичности / Э. Рейс // Теория пластичности. – М. : Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 206–222.

УДК

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ МОРСЬКИХ ПОРТОВИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ПАЛЬОВОГО ТИПУ

Цвігун С.І., Іванець Г.Є., гр. ПЦБ-608м(н).

Науковий керівник – Рубцова Ю.О. Консультант – к.т.н., доц.

Данелюк В.І.

Актуальність. Морські причали - це технічні об'єкти, які будуються і експлуатуються у сфері складного довготривалого впливу або прямої дії одночасно трьох середовищ: суша-повітря-вода, а також значних силових експлуатаційних навантажень. Зростання ризику виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з ненормативними навантаженнями на конструктивні елементи причалів, складні природні дії на будівельні матеріали споруд, а також обмежені умови проведення ремонтно-