

УДК 624.0.12.464.3

к.т.н., доцент Журавський О.Д., Горобець А.М.,
Київський національний університет будівництва та архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕДНЬО-НАПРУЖЕНИХ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ ПЛИТ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ЗГИНІ

Наведено результати експериментальних та теоретичних досліджень міцності і деформативності сталевібробетонних двоосно попередньо-напружених плит при дії поперечного навантаження.

Ключові слова: сталевібробетон, двохосно попередньо-напружені плити, втрати попереднього напруження, скінчені елементи.

Вступ. У зв'язку з пошуком нових високоміцних матеріалів з високими деформативними характеристиками, в наш час все більшого поширення набувають матеріали з використанням композитних домішок. До таких матеріалів відноситься сталевібробетон, який характеризується підвищеною міцністю на згин та високою деформативністю. Ці характеристики дуже важливі для сучасного будівництва, яке характеризується збільшенням прольотів та зменшенням власної ваги будівельних конструкцій. Використання великорозмірних елементів у вигляді плит, панелей економічно доведено. Також доведено, що використання конструкцій з двоосним обтиском є найбільш доцільним. Тому дослідження міцнісних і деформативних характеристик двоосно попередньо напружених сталевібробетонних плит є досить актуальним і практично невирішеною задачею.

Постановка проблеми. Вивченням властивостей сталевібробетону займалися багато вітчизняних та іноземних вчених [1, 3...5, 7...9]. Ці дослідження показали, перспективність використання сталевібробетону в будівельній галузі. Більшість робіт були присвячені вивченню характеристик сталевібробетону, таких як вплив виду, кількості, орієнтації, міцності і форми сталевих фібр, а також структури і міцності бетонної матриці на міцність, деформативність, морозостійкість, водонепроникність, тріщиностійкість та інші характеристики сталевібробетону. Але робіт, присвячених дослідженню попередньо обтиснутого сталевібробетону в одному та двох напрямках недостатньо.

Мета досліджень. Актуальність проведеної роботи полягає в тому, що даних для застосування сталевібробетону в попередньо напружених конструкціях недостатньо, тим більше напружених у двох напрямках. Щоб виправити цю прогалину у дослідженні перспективного для використання

матеріалу і було проведено експериментальні дослідження одно- та двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит з різними рівнями обтиску.

Методика досліджень. Було досліджено дві серії плит розміром $800 \times 800 \times 40$ мм с різним фібровим армуванням. Зразки серії I армувались сумішшю сталевих фібр марки STAFIB 50/1.0 та STAFIB 30/0.6 із анкерами на кінцях, процентне відношення яких становило по 0,5% по об'єму кожної фібри. Зразки серії II містили 1,0% по об'єму хвилястих фібр марки NOVOKON URW 50/1.0. Для всіх зразків був використаний портландцемент марки М400, а як дрібний заповнювач – кварцовий пісок. Склад сталевібробетону по об'єму був прийнятий у пропорції 1:3 цементу до піску при водоцементному відношенні 0,62.

Сталевібробетонні плити, виготовлялися в інвентарній металевій опалубці. Бетонування виконувалося у горизонтальному положенні. Ущільнення сталевібробетону відбувалося протягом 2...3 хв поверхневим вібратором.

В дослідженні використовувалися плити після тривалих досліджень по визначенню втрат попереднього напруження від усадки та повзучості сталевібробетону. Об'єм та характеристика плит-зразків перед дослідженням показано в табл.1. Рівні попереднього обтиску сталевібробетону в момент прикладення рівномірного навантаження визначалися з урахуванням втрат попереднього напруження від усадки та повзучості сталевібробетона.

Спирання плит було прийнято шарнірне по чотирьом сторонам на відстані 50 мм від бокових граней плити. Завантаження плити виконувалося 16 зосередженими силами у відповідності до схеми, яка показана на рис. 1.

Під час навантаження плит вимірювалися прогини у центрі плит. Для цього використовувалися індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Крім того, виконувалися вимірювання переміщення плити над опорами.

Навантаження створювалося двома гідравлічними домкратами міцністю до 200 кН кожний. Після чого навантаження через систему траверс передавалося на плиту (рис. 1, б).

Навантаження виконувалось кроком $P_1=2$ кН з витримкою 5...8 хв на кожному кроці для вимірювання прогинів. Величину навантаження фіксували по показникам зразкового манометра гідравлічної насосної станції. Перед початком дослідів всю гідросистему (насосна станція, домкрат, зразковий манометр) тарували за допомогою зразкового динамометра.

Результати досліджень. Під час дослідження було встановлено зусилля тріщиноутворення та руйнуюче зусилля попередньо напружених сталевібробетонних плит та плит без попереднього напруження (табл. 2).

З табл. 2 видно, що в плитах I-ПП-0,7/0,7 візуальна поява тріщин зафіксована при навантаженні $P_{\text{ср},1}=11,8$ кН, в плитах I-ПП-0,7/0,3 – при

Таблиця 1. Об'єм та характеристика плит-зразків для дослідження

Номер серії	Марка зразка	Кількість зразків, шт.	Вік сталевібро-бетону в момент дослідження, діб	Призмova міцність сталевібро-бетону в момент дослідження, МПа	Величина попереднього напруження арматури в момент дослідження, МПа		Величина попереднього обтиску сталевібробетону в момент дослідження, МПа		Відносна величина стискаючих напружень у сталевібро-бетоні	
					по осі х	по осі у	по осі х	по осі у	по осі х	по осі у
I	I-III-Y	2	154	13.4	-	-	-	-	-	-
	I-III-0.7/0.0	2	161	13.4	820	-	4,6	0,34	-	-
	I-III-0.7/0.3	2	223	13.8	998	644	5,6	0,41	0,17	0,17
	I-III-0.7/0.7	2	233	13.8	1040	1040	5,9	0,42	0,42	0,42
II	II-III-Y	2	136	9.2	-	-	-	-	-	-
	II-III-0.7/0.0	2	136	9.2	926	-	5,2	0,56	-	-
	II-III-0.7/0.3	2	133	10.2	940	636	5,2	0,5	0,23	0,23
	II-III-0.7/0.7	2	133	10.2	944	960	5,3	0,51	0,51	0,51

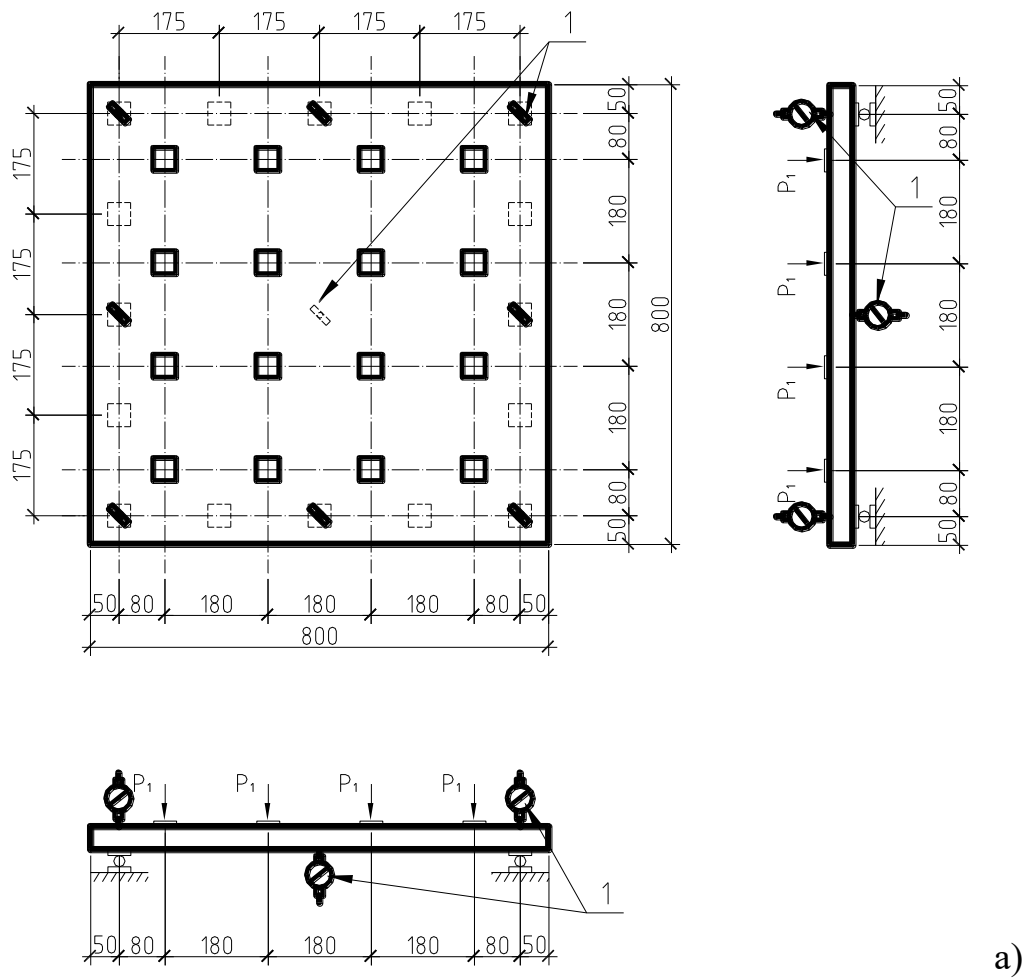


Рис.1. Схема завантаження плити (а) та загальний вигляд установки для випробування плит (б): 1 – індикатори-прогиноміри.

$P_{\text{срс},1}=15,1$ кН а в плитах І–ПП–0,7/0,0 – при навантаженні $P_{\text{срс},1}=6,85$ кН. Поява тріщин у ненапруженій плиті І–ПП–У зафіксована при навантаженні $P_{\text{срс},1}=5,4$ кН, тобто раніше, ніж в попередньо напружених.

Тріщиноутворення в плитах другої серії ІІ–ПП–0,7/0,0 та ІІ–ПП–0,7/0,3 фіксувалося при навантаженні $P_{\text{срс},1}=9,8$ кН, а в плитах ІІ–ПП–0,7/0,7 – при навантаженні $P_{\text{срс},1}=11,3$ кН. Поява тріщин у ненапруженій плиті ІІ–ПП–У була зафіксована при навантаженні $P_{\text{срс},1}=5,4$ кН.

Аналізуючи отримані дані, видно зростання зусилля тріщиноутворення при збільшенні зусиль попереднього напруження, а також вплив бокового обтиску на ці значення. Експериментально доведено, що характер розвитку тріщин в попередньо напружених та ненапружених плитах різних. В плитах І–ПП–У перші тріщини виникли в зонах дії максимальних згинальних моментів паралельно стержням арматури обох напрямків. В плитах І–ПП–0,7/0,0 аналогічні тріщини утворилися лише у напрямках перпендикулярних ненапруженим стержням. Тріщини в кутах нижніх поверхонь утворилися в усіх плитах практично при однаковому навантаженні. По напрямку цих тріщин і відбувалося руйнування плит.

Плити серії І І–ПП–0,7/0,7 руйнувалися при навантаженні $P_1=25,1$ кН, а плити І–ПП–0,7/0,3 – при $P_1=22,1$ кН. Руйнуюче навантаження в плитах І–ПП–0,7/0,0 дорівнювало $P_1=17,6$ кН. Ненапружена плита І–ПП–У зруйнувалась при $P_1=15,7$ кН, але треба зазначити, що одна з цих плит зруйнувалась при $P_1=19,6$ кН, що не набагато менше ніж у попередньо напружених плит. Така розбіжність серед плитами-зразками виникла внаслідок прийнятого кроку армування по осі У.

Руйнування плит другої серії ІІ–ПП–0,7/0,7 відбувалось при навантаженні $P_1=26,9$ кН, а плит ІІ–ПП–0,7/0,3 – при $P_1=23,1$ кН. Руйнуюче навантаження в плитах ІІ–ПП–0,7/0,0 дорівнювало $P_1=18,6$ кН. Ненапружена плита ІІ–ПП–У зруйнувалась при $P_1=21,1$ кН.

Чисельні дослідження. Для перевірки експериментальних досліджень був виконаний розрахунок сталевібробетонних плит з використанням програмного комплексу «ЛИРА-САПР», який дозволяє моделювати роботу залізобетонних конструкцій з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності [14].

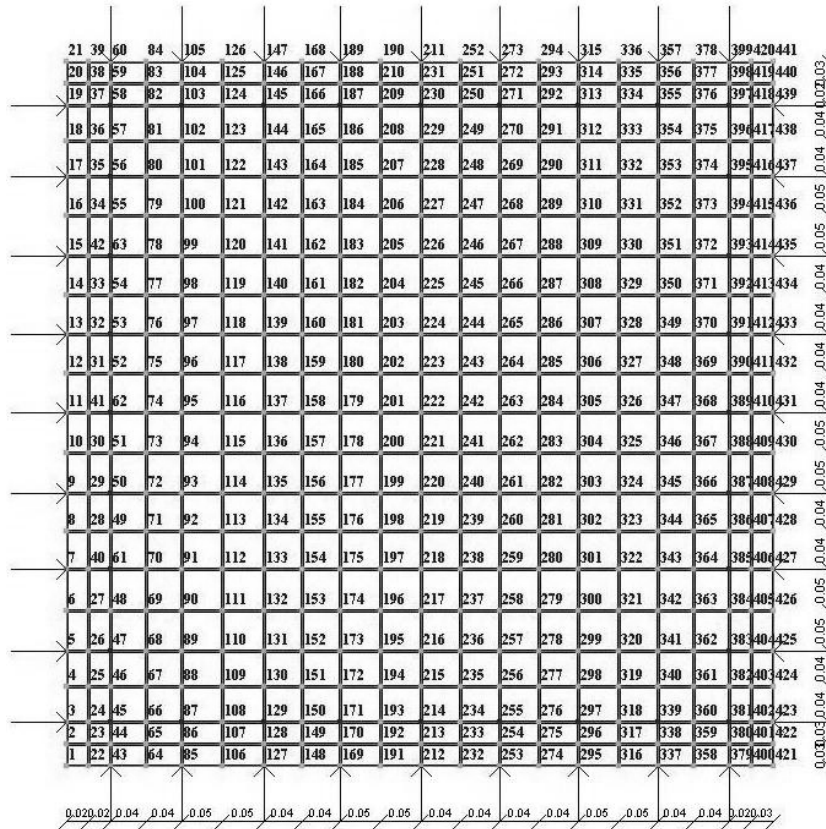
Для визначення напружено-деформованого стану сталевібробетонних плит була створена розрахункова схема. Плити моделювалися квадратними та прямокутними скінченими елементами (КЕ) згідно з рекомендаціями [14]. Зусилля попереднього напруження було задано у вигляді зосереджених зовнішніх сил, прикладених у відповідних вузлах (рис. 2). Крок арматури для різних плит по осі Х був однаковий і складав 89 мм, а по осі У коливався від 89

мм до 133 мм. Таким чином, для розрахунку плит було створено дві різні розрахункові схеми, які враховували нерівномірність прикладення сил.

Таблиця 2. Міцність і тріщиностійкість плит серії I та II

Номер серії	Марка плити	Зусилля тріщиноутворення, $P_{ср.1}$, кН		Руйнівне зусилля, P_1 , кН	
		однієї плити	середнє	однієї плити	середнє
I	I – ПП–0.7/0.0-1	7.8	6.9	19.4	17.6
	I – ПП–0.7/0.0-2	5.9		15.7	
	I – ПП–0.7/0.3-1	14.7	15.1	21.6	22.1
	I – ПП–0.7/0.3-2	15.7		22.6	
	I – ПП–0.7/0.7-1	12.8	11.8	25.5	25.1
	I – ПП–0.7/0.7-2	10.8		24.5	
	I – ПП –У-1	4.9	5.4	11.8	15.7
	I – ПП –У-2	5.9		19.6	
II	II – ПП–0.7/0.0-1	9.8	9.8	17.6	18.6
	II – ПП–0.7/0.0-2	9.8		19.6	
	II – ПП–0.7/0.3-1	9.8	9.8	18.6	23.1
	II – ПП–0.7/0.3-2	9.8		27.5	
	II – ПП–0.7/0.7-1	11.8	11.3	25.5	26.9
	II – ПП–0.7/0.7-2	10.8		28.4	
	II – ПП –У-1	4.9	5.4	17.7	21.1
	II – ПП –У-2	5.9		24.5	

a)



b)

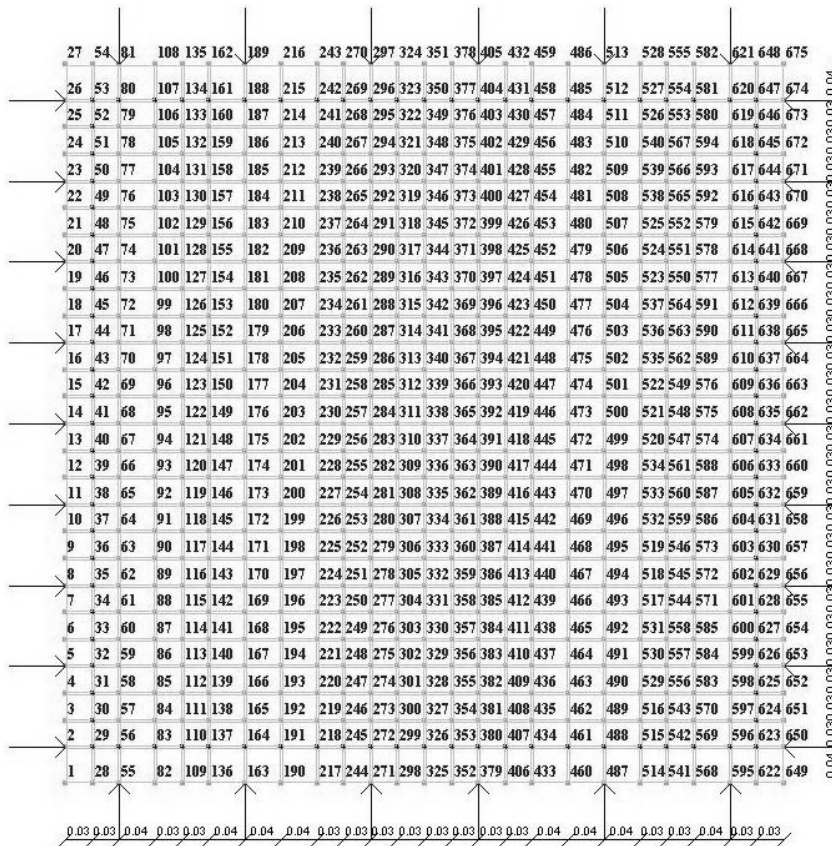


Рис.2. Розрахункова схема дослідної плити побудована в ПК «ЛИРА-САПР»

Схема 1 створена для плит двохосно обтиснутих плит з однаковим рівнем обтиску та плит одноосно обтиснутих. Схема 2 створена для плит без попереднього напруження і плит з різним рівнем обтиску. Схема 1 складалася з 500 скінчених елементів та 441 вузла, схема 2 – з 624 скінчених елементів та 672 вузла. У розрахунку прийнято наступні напрямки координатних осей: вісь X направлена від вузла 1 до вузла 22 для схеми 1 та від вузла 1 до вузла 28 для схеми 2, вісь Y – від вузла 1 до 2, а вісь Z утворює з осями X та Y праву трійку.

Жорсткість плит задавалась з бібліотеки скінчених елементів ПК «ЛИРА-САПР», який дозволяє враховувати фізичну і геометричну нелінійність при розрахунку. Для розрахунку прийнято наступні позначення вхідних даних: h – товщина плити; ν – коефіцієнт Пуассона; E_{cf} – модуль пружності сталевібробетону; f_{cd} – розрахунковий опір сталевібробетону на стиск (призмova міцність); f_{ctd} – розрахунковий опір сталевібробетону на розтяг; E_s – модуль пружності арматури; f_{yd} – розрахунковий опір арматури на розтяг; H_i – висота (товщина) ділянки; A_{sxi} – площа арматури розміщена вздовж осі X на погонний метр перерізу; A_{syi} – теж саме, вздовж осі Y .

Для моделювання роботи сталевібробетону використовувався кусково-лінійний закон деформування, а для арматури – експоненціальний закон деформування.

Розрахунок здійснювався для навантажень, які відповідають крокам завантаження, а величини зусиль попереднього напруження приймалися по вже встановленим до початку дослідження напруженням в арматурі з урахуванням усіх втрат [2]. Теоретичні та експериментальні графіки прогинів наведені на рис. 3 і 4. Аналіз графіків показує достатнє співставлення теоретичних та експериментальних даних.

Висновки. Таким чином можна констатувати, що зусилля тріщиноутворення в двохосно напружених плитах в 2 рази вище, ніж в одноосно напружених і в 2,5 разів вище ніж в ненапружених. Зусилля тріщиноутворення одноосно попередньо напружених плит вище від ненапружених у 1,3...2,1 рази.

Попереднє напруження не істотно впливає на величину несучої здатності плит. Більш того, спостерігається деяке зменшення міцності при зростанні інтенсивності обтиску бетону попередньо напруженою арматурою у напрямку осі Y . Але ці зміни не значні і знаходяться в межах допустимого розсіювання результатів, що дозволяє робити достовірні висновки.

ПК «ЛИРА-САПР» дає можливість з достатньою ступеню точності моделювати роботу двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит.

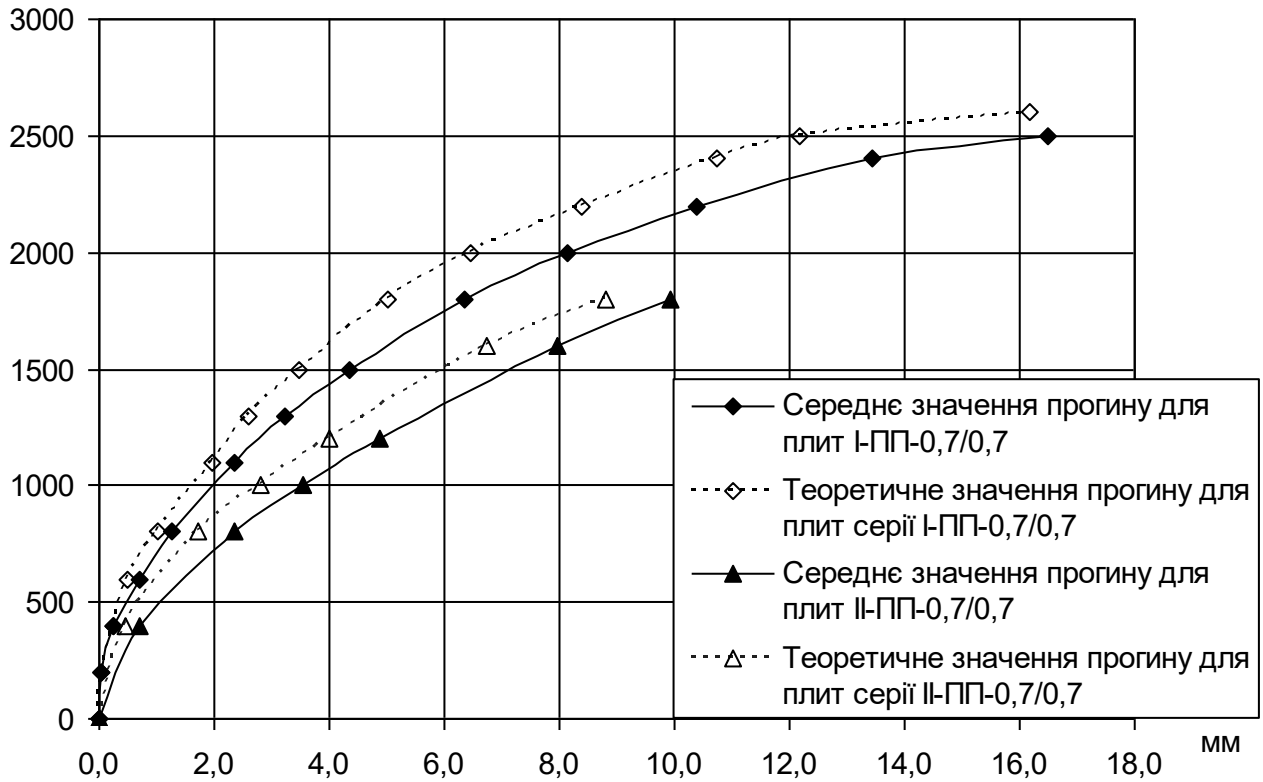
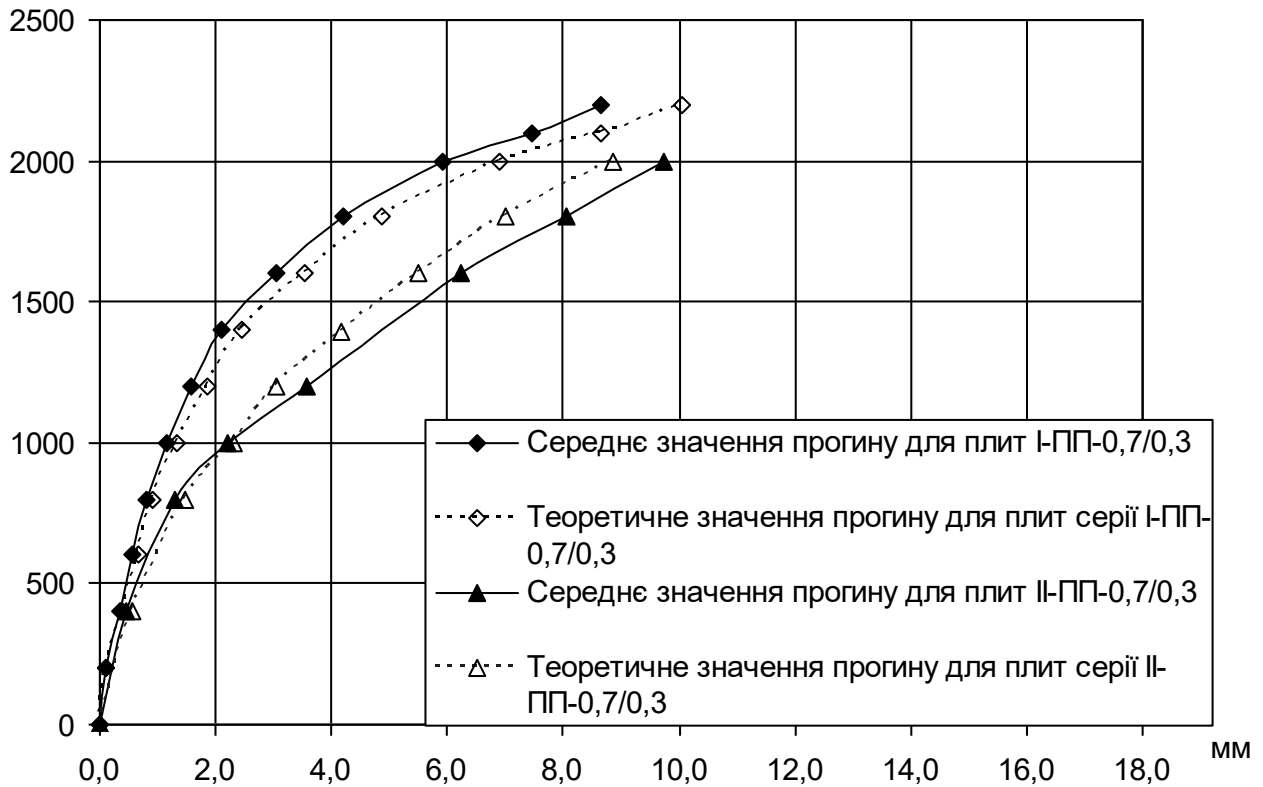
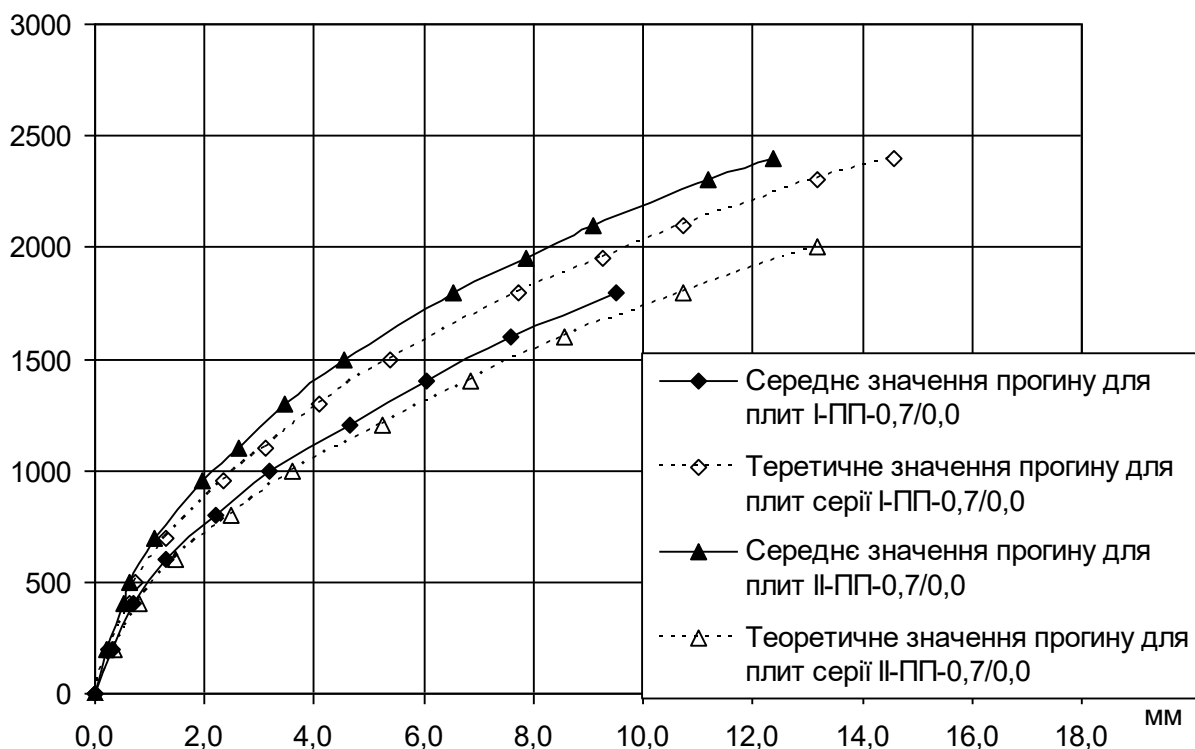
а) P_1, H б) P_1, H 

Рис. 3. Графіки прогинів плит серії I та II:
 а) I-ПП-0,7/0,7; II-ПП-0,7/0,7; б) I-ПП-0,7/0,3; II-ПП-0,7/0,3

а) P_1, H



б) P_1, H

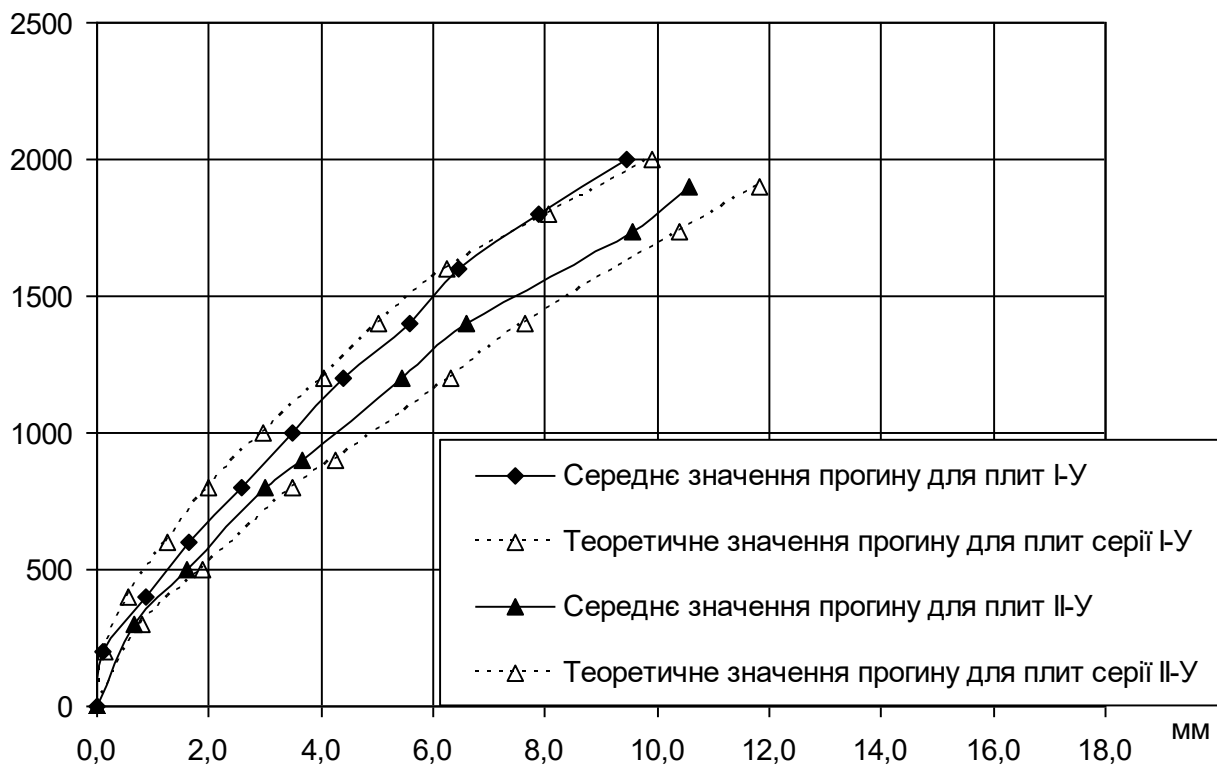


Рис. 4. Графіки прогинів плит серії I та II: а) I-ПП-0,7/0,3; II-ПП-0,7/0,3; б) I-U; II-U

Література

1. Бочарников А.С., Корнеев А.Д. Зона взаимодействия систем “бетон – стальное волокно” в сталефибробетоне и рациональная степень дисперсного армирования мелкозернистого бетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2005. - №8. - С. 58-59.
2. Горобець А.М., Журавський О.Д. Експериментально-теоретичні дослідження втрат попереднього напруження в сталефібробетонних конструкціях при одновісному та двовісному обтіску // Теорія і практика будівництва: Вісник НУ «Львівська політехніка». №600. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2007. - С. 68-74.
3. Коротышевский О.В. Расчёт сталефибробетона по прочности на осевое растяжение и на растяжение при изгибе // Строительные материалы. - 2003. - №8. - С. 31-33.
4. Лысенко Е.Ф., Гетун Г.В. Проектирование сталефибробетонных конструкций. Учеб. пособие. – К.:УМК ВО, 1989. – 184 с.
5. Миловидов.К.И, Мишуков Н.Е. Рациональные области применения фибробетона в конструкциях // Бетон и железобетон, - 1980. №5. – С.29-30.
6. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013. Учебное пособие / [Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов и др.]; под редакцией А.С. Городецкого.-М., 2013 г. -376 с.
7. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны. – М.: Стойиздат, 1989. – 176 с.
8. Талантова, К.В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами // Бетон и железобетон. - 2003. - №5. - С.4-8
9. Цернант А.А. Оценка эффективности сталефибробетонных конструкций в эксплуатационный период // Транспортное строительство. - 2004. - №10. - С. 31-32 .

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований прочности и деформативности сталефибробетонных двухосных предварительно напряженных плит при действии поперечной нагрузки.

Ключевые слова: сталефибробетон, двухосно предварительно-напряженные плиты, потери предварительного напряжения, конечные элементы.

Annotation

There are given the results of experimental and theoretical studies strength and deflection of steel fiber reinforced concrete biaxially prestressed slabs under the action of transverse load.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, biaxially prestressed slabs, prestressing loss, finite elements.