

УДК 624.072.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64440>

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАН СТАЛЕБЕТОННИХ ПУСТОТНИХ ПЛИТ

К-т техн. наук О.В. Лобяк, здобувач Д.В. Головка (Український державний університет залізничного транспорту)

STRESS-STRAIN AND LIMITING STATE OF STEEL-CONCRETE AND HOLLOW CORE SLABS

Cand. of techn. sciences A. Lobiak, candidate D. Golovko (Ukrainian State University of Railway Transport)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ И ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕЛЕБЕТОННЫХ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ

К-т техн. наук А.В. Лобяк, соискатель Д.В. Головка (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

Представлені результати чисельних і експериментальних досліджень сталебетонних пустотних плит перекриття. Розроблено скінченно-елементні моделі суцільних і пустотних перекриттів та на їх основі виконана оцінка напружено-деформованого і граничного стану системи з урахуванням податливості зв'язків та нелінійних властивостей матеріалів. В

результаті визначено раціональну геометричну форму, розміри і розташування пустотоутворювачів. Виконано порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Ключові слова: скінченно-елементна модель, бетон, сталь, плити перекриття, сталебетон, анкерні упори, пустотоутворювач.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований сталебетонных пустотных плит перекрытия. Разработаны конечно-элементные модели сплошных и пустотных перекрытий и на их основе выполнена оценка напряженно-деформированного и предельного состояния системы с учетом податливости связей и нелинейных свойств материалов. В результате определена рациональная геометрическая форма, размеры и расположение пустотообразователей. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, бетон, сталь, плиты перекрытия, сталебетон, анкерные упоры, пустотообразователь.

The results of numerical and experimental studies of steel-concrete hollow-core slabs are presented. Finite element model of solid and hollow reinforced concrete slabs are developed on their basis the evaluation of the stress-deformed and limiting condition of the entire system and its elements, taking into account the specifics of the construction, compliance of connection within the contact of concrete and steel, the effect of non-linear properties of the materials are produced. As a result the rational geometric shape and the location of the emptiness-former in the body concrete are defined. According to the test the results of change dependence of the relative deformation in the steel sheet and on the surface of the concrete slab from external loads are built. The data of the bearing capacity and the nature of the crack formation are obtained. The comparison of theoretical and experimental results is performed. The assumption about the cutoff of the construction of the blockout sectors is confirmed.

Keywords: finite-element model concrete, steel, floor slabs, steel-concrete, anchor elements, blockout

Вступ. Сучасний розвиток будівництва передбачає використання передових технологій, раціональних конструктивних рішень та вдосконалених методів розрахунку як при зведенні нових, так і реконструкції існуючих споруд. У цьому розумінні багато в чому прогресивним стало впровадження нових конструктивних рішень сталебетонних перекриттів, які дозволяють забезпечити потрібну форму, розміри і несучу здатність. Найбільший ефект від зовнішнього армування досягається в плитах перекриття, що згинаються в двох напрямках. Плоский сталевий лист працює в умовах двовісного напруженого стану, завдяки чому в порівнянні з залізобетонними плитами підвищується жорсткість і несуча здатність сталебетонних аналогів при рівній витраті металу [1-4].

Ефективність прийняття рішень при проектуванні будівельних конструкцій в

цілому і сталебетонних перекриттів зокрема безпосередньо залежить від реалізованого методу розрахунку. При цьому досягнення найкращих результатів може бути забезпечено застосуванням сучасних методів чисельного аналізу та комп'ютерного моделювання [5].

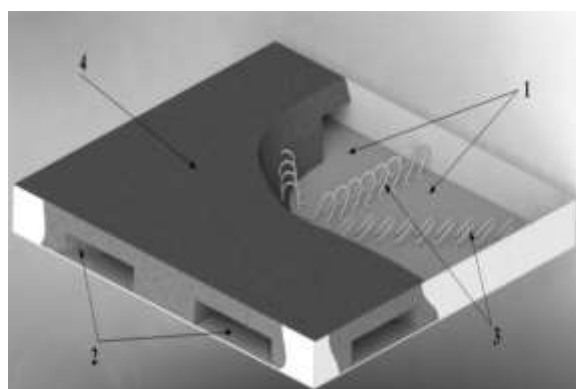
Мета та задачі дослідження. Завданнями розвитку будівельної галузі є забезпечення надійності будівель і споруд при одночасному зниженні їх матеріалоємності, вартості, трудомісткості на етапах проектування, монтажу та експлуатації. Пріоритетним показником у задачах підвищення економічної ефективності сталебетонних перекриттів прийнято вважати витрати бетону, що визначає власну вагу і вартість конструкцій. Перспективним напрямком у дослідженнях щодо зниження витрат бетону є розробка раціональних схем утворення пустот, які забезпечують ефективність і необхідну

несучу здатність. У зв'язку з цим становить науковий і практичний інтерес розробка, теоретичне та експериментальне обґрунтування нових, більш універсальних і конкурентоспроможних рішень плит перекриттів з сталобетону.

Дана робота спрямована на вдосконалення сталобетонних плит через експериментально-теоретичний пошук можливостей зниження власної ваги конструкції за рахунок введення до її складу пустот. У цьому напрямку особливий інтерес заслуговує питання впливу пустотних

включень на напружено-деформований та граничний стан сталобетонних плит.

Основна частина дослідження. Запропонована конструкція сталобетонного пустотного перекриття складається з металевих листів, пустотоутворювачів і бетону. При цьому спільна робота бетону і сталі забезпечується анкерними упорами, розташованими по осях симетрії (рис.1). Передбачається, що ефективність перекриття залежить від раціонального визначенні розмірів і схеми розстановки пустотоутворювачів.



Серія	Параметри, мм							
	n	l_1	l_2	h_1	h_2	a_1	b_1	c_1
СП50	11	400	200	40	70	-	-	-
СП100	6	400	200	40	70	-	-	-
СПМ50	11	400	200	40	70	250	250	350
СПМ100	6	400	200	40	70	250	250	350
СПБ50	11	400	200	40	70	300	300	420
СПБ100	6	400	200	40	70	300	300	420

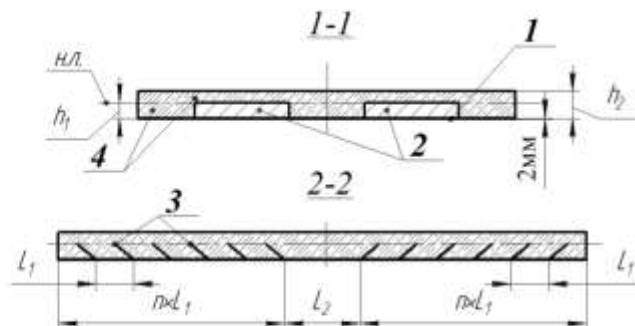
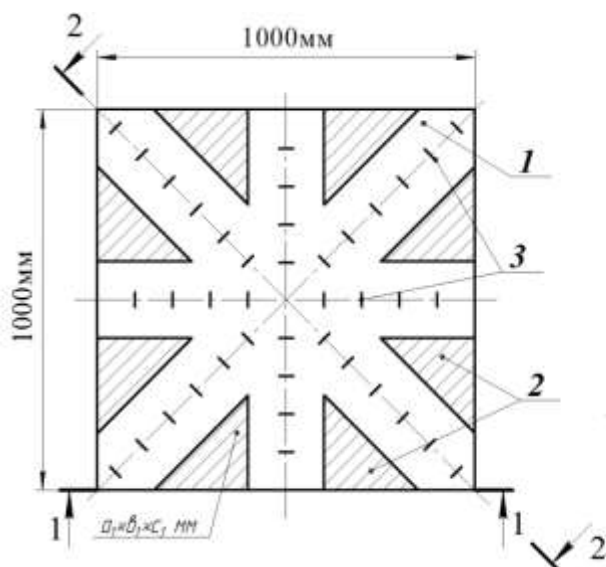


Рис.1. Загальний вид запропонованої конструкції та її схема в плані:

1 – металевий лист; 2 – вставки пустотоутворювачів;
3 – анкерні упори; 4 – бетон

Будемо вважати, що на першому етапі вибір ефективних параметрів пустот можна зробити через аналіз напружено-деформованого стану аналогічної суцільної плити. Для вирішення поставлених завдань ефективно застосування сучасних засобів

чисельного аналізу на основі МСЕ. Тому, в якості інструменту для подальших досліджень приймемо програмний комплекс Ліра [6], який в повній мірі дозволяє розкрити всі особливості розглянутої конструкції.

Запропонована розрахункова схема розроблена з використанням п'яти типів скінченних елементів (далі – СЕ). Бетонна частина являє собою сукупність СЕ, призначених для розрахунку масивних просторових конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності матеріалу. При моделюванні металевих листів застосовувалися геометрично-нелінійні СЕ, які виключають згибну складову в роботі оболонки (мембрани). Пружні зв'язки між мембраною і бетоном задавалися за допомогою двохвузлових СЕ кінцевої жорсткості.

Граничні умови визначені призначенням конструкції і виконані через защемлення металевих листів по кутах. Для математичного опису роботи бетону прийнятий експоненціальний закон деформування. Навантаження прикладалося в центр плити по поверхні з розмірами 20×20 см. Розрахунок виконувався кроково-ітераційним методом до появи граничного стану в плиті.

У результаті аналізу роботи суцільних плит перекриття встановлено особливості деформування, тріщиноутворення, розподілу напружень (рис. 2), та закони зміни зусиль зсуву по контакту сталі та бетону.

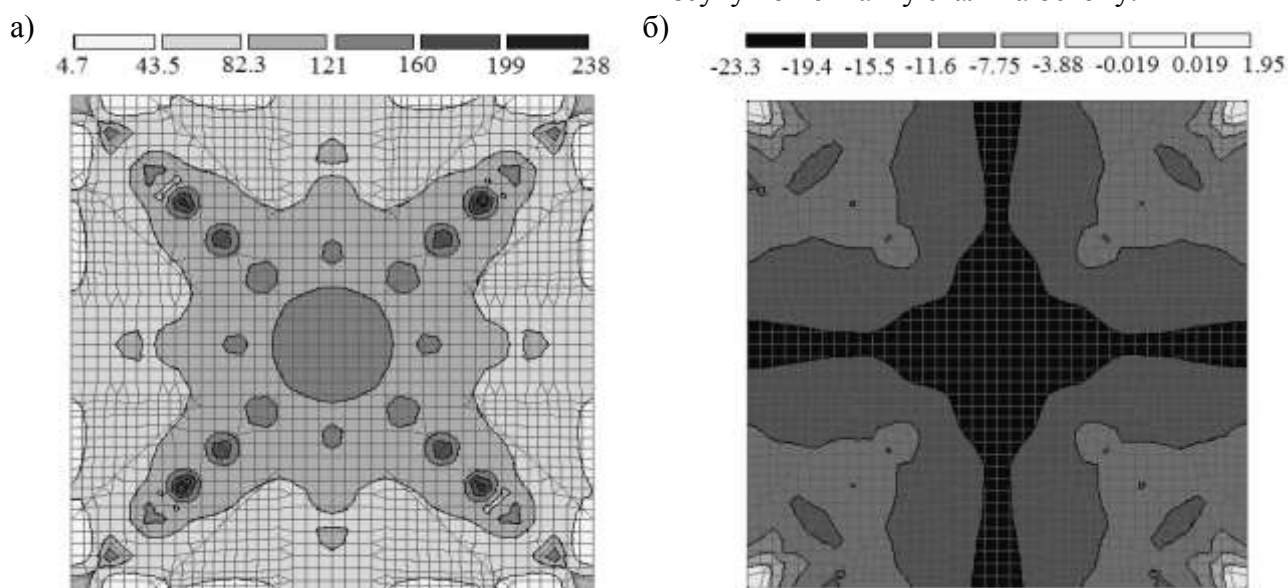


Рис. 2. Ізополя напружень в сталевому листі (а) та на верхній поверхні бетону (б) для суцільної плити, МПа

На наступному етапі в роботі були розроблені скінченно-елементні моделі пустотних плит і одночасно виконувалася вибірка конструкцій з раціональним діапазоном характеристик для експериментальних досліджень. Так були змодельовані пустотні зразки серій СПМ і СПБ (рис. 1) з різним кроком анкерних упорів. Місця розташування пустот в бетоні визначалися аналізом головних напружень в мембрані. Утворення пустот приймалося в розтягнутій зоні бетону, яка контактує з мембраною в області малих напружень.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану плит з пустотами встановив наступні особливості.

1. Вичерпання несучої здатності пустотної сталобетонної плити відбувається в момент досягнення граничних напружень в бетоні і локально – в мембрані (рис. 3,4).

2. Стискаючі напруження в бетоні виникають уздовж ліній, що проходять через середини сторін у верхній грані і в опорних елементах – у нижній грані. При цьому максимальні значення напружень зверху плити досягають -24.4 МПа, а в опорних елементах -22 МПа (рис. 3).

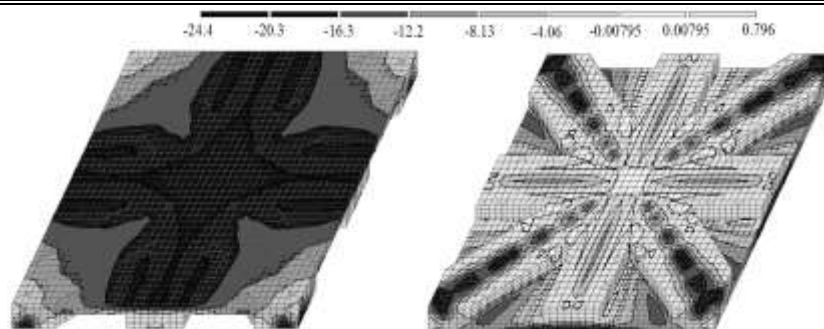


Рис.3. Ізополя головних стискаючих напружень в бетоні зразка СПМ50, МПа

3. Напруження розтягу в бетоні переважно виникають за межами пустот, поширюються к центру плити і складають на останній стадії 1.95 МПа.

4. Розподіл напружень в металевому листі виражено уздовж його діагоналей, починаючи від вузлів закріплення і закінчуючи в центрі. При цьому, значення

напружень, що виникають під поверхнею прикладання навантаження, не перевищує 142-164 МПа. Максимальні напруження виникають навколо зв'язків зсуву, розташованих найближче до центру і складають 208 МПа для зразків СПМ і 240 МПа – для зразків серії СПБ (рис.4).

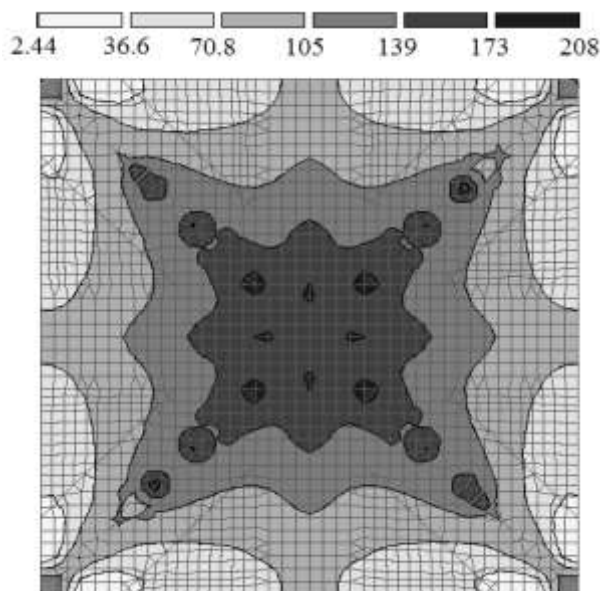


Рис.4. Ізополя еквівалентних напружень зразка СПМ50, МПа

5. Уздовж діагоналей екстремум зусиль виникає в зв'язках, розташованих на відстані 25-35 см від вузлів закріплення листа. Напруження в зв'язках становлять 75-90% від розрахункового опору матеріалу анкера.

Для перевірки зроблених припущень на наступному етапі були проведені експериментальні дослідження. Для випробувань прийнято три серії зразків: СПМ (рис. 5), СПБ – сталебетонні пустотні; СП – сталебетонні суцільні.

Усі розглянуті зразки представляють собою еталони розрахункових моделей і за розмірами не мають схожості з плитами, рекомендованими для застосування. Разом з тим передбачається, що після відповідної верифікації, основні висновки, отримані в процесі дослідження, можуть також поширюватися на плити, рекомендовані для практичного використання.

Спільна робота сталевго листа і бетону забезпечується за рахунок петльових анкерів, встановлених з кроком 50 мм (СП50, СПМ50, СПБ50) і 100 мм (СП100, СПМ100,

СПБ100). Матеріал анкера – дрід класу Вр-1 діаметром 4 мм. Форма пустотоутворювачів представляє собою тригранну призму висотою 40 мм і розмірами в плані 250×250×350 мм (СПМ50, СПМ100) або 300×300×420 мм (СПБ50, СПБ100). Матеріал пустотоутворювачів – пінополістирол.

Для визначення міцності матеріалів попередньо виконувалося випробування контрольних бетонних і сталевих зразків. За

усередненими значеннями кубкової міцності бетону $f_{ck.cube} = 36.7$ МПа прийнятий клас бетону С30/35. Границя текучості сталі $f_{yd} = 225$ МПа, тимчасовий опір на розтяг $f_{au} = 290$ МПа.

При випробуванні плит деформації вимірювалися методом електротензометрії із застосуванням тензорезисторів з базою 10 мм на сталевому листі (ДС) і базою 15 мм (ДБ) – на бетоні (рис. 6).

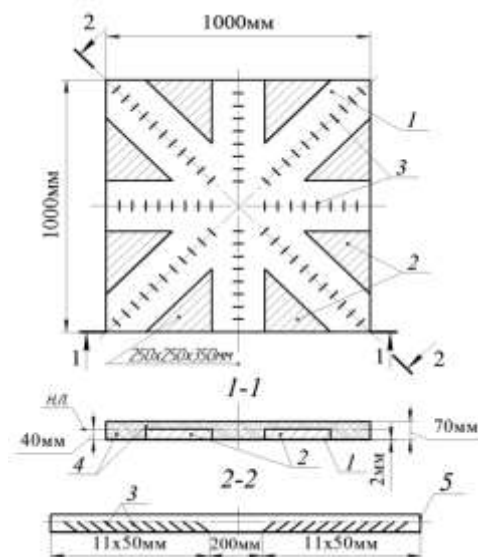
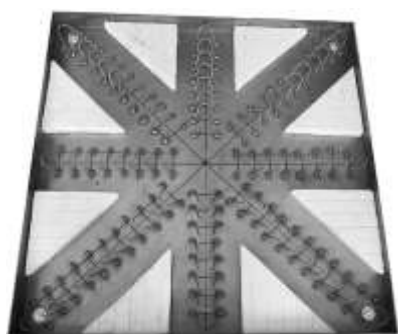


Рис. 5. Зовнішній вигляд до бетонування та схема зразка СПМ: 1 – металевий лист; 2 – пустотоутворювач; 3 – анкерні упори; 4 – бетон

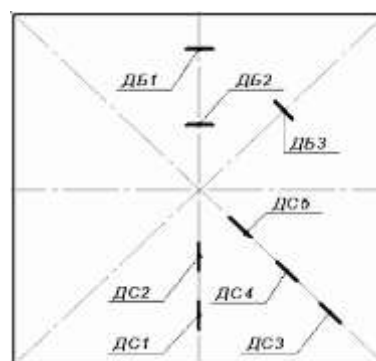


Рис.6. Експериментальна установка і схема розстановки датчиків

Показання датчиків визначали за допомогою багатоканальної вимірювальної системи ВНП-8, прогини – індикаторами часового типу. Навантаження виконувалося ступенями по 5 кН з 20-ти хвилинною

витримкою на кожній ступені. В результаті випробування отримані дані про несучу здатність плит (табл. 1), характер деформування і тріщиноутворення.

Дані за результатами випробувань

Серія зразків	Несуча здатність, кН	Прогин при навантаженні 120 кН, мм	Деформація в бетоні при навантаженні 120 кН, $\epsilon_c \cdot 10^{-3}$		Деформація в металі при навантаженні 120 кН, $\epsilon_{au} \cdot 10^{-3}$	
			в центрі плити	по діагоналі	в центрі плити	по діагоналі
СП50	150	8.64	-1.67	-1.34	0.59	0.83
СП100	135	9.06	-2.01	-1.67	0.59	0.95
СПМ50	150	9.34	-1.78	-1.48	0.72	0.94
СПМ100	130	9.86	-2.25	-1.89	0.81	1.02
СПБ50	145	10.25	-2.52	-1.69	0.74	0.98
СПБ100	130	11.04	-2.79	-1.97	0.84	1.09

За результатами випробувань для зразків усіх серій отримані залежності зміни відносних деформацій на поверхні сталевих листів і бетону від зовнішнього

навантаження. Як приклад у статті наводяться результати для деформацій, отриманих при випробуванні плити СПБ50 (рис. 7, 8).

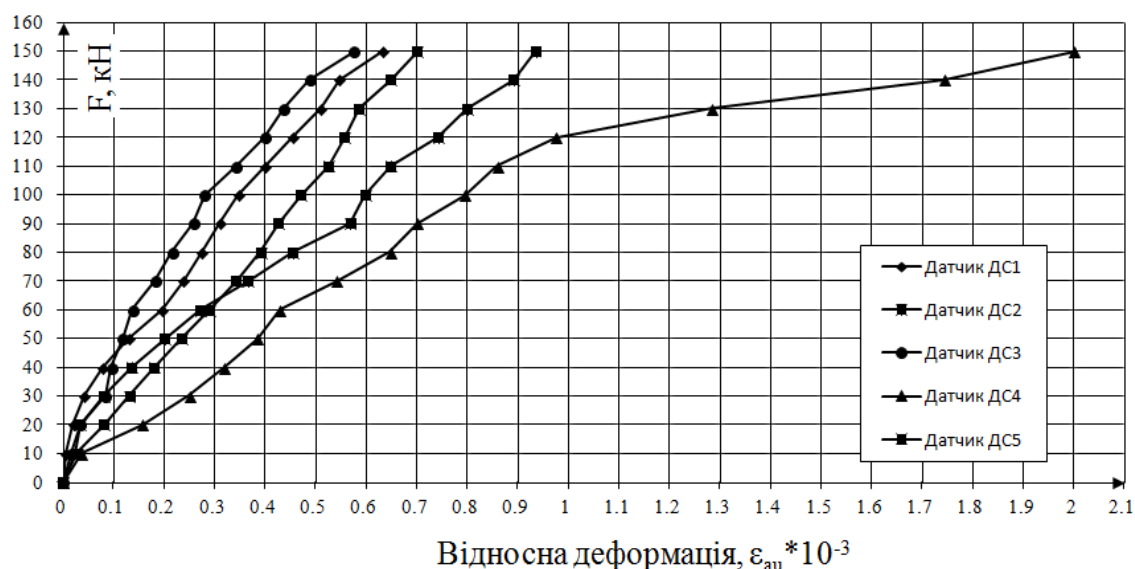


Рис.7. Графік залежності ϵ_{au} (F) для металевих листів зразка СПБ50

За отриманими результатами встановлено, що на початковій стадії навантаження переважно виникають пружні деформації. При навантаженні рівному 55-65% від руйнуючого в бетонній частині уздовж центральних осей спостерігається поява перших тріщин, а в сталевому листі при цьому розвиваються напруження в діапазоні 45-57% від границі текучості.

Напруження в листі переважно виникають в напрямку діагоналей та становлять 84-115 МПа. В області анкерів рівень напружень вище на 20-35% в порівнянні з іншими точками, що лежать уздовж анкерних ліній. При досягненні навантажень більше 85-90% від руйнуючого, спостерігається інтенсивне розповсюдження тріщин та руйнування бетону.

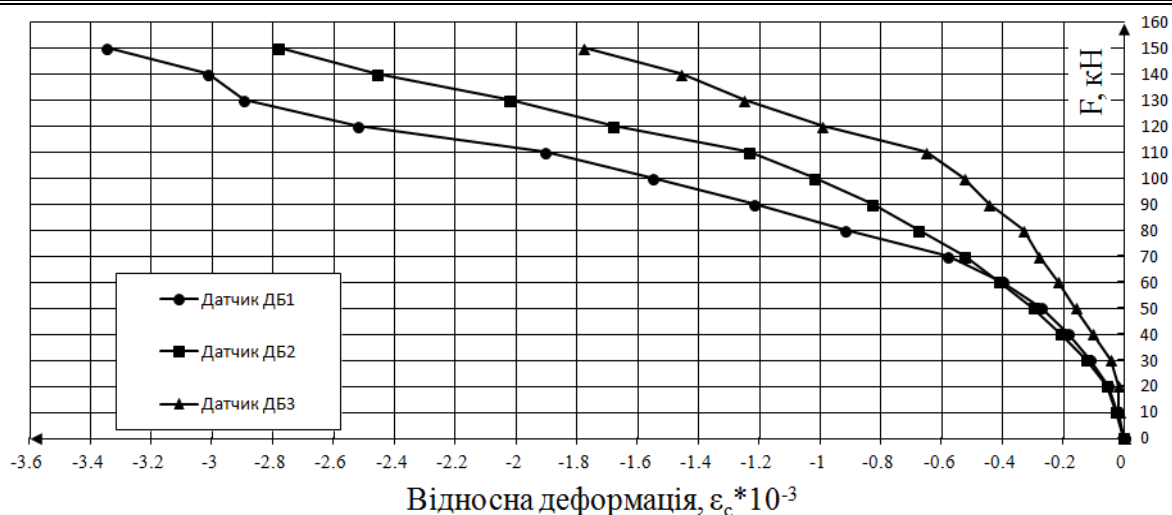


Рис.8. Графік залежності $\epsilon_c(F)$ для бетону зразка СПБ50

Відмінність зразків з кроком анкерних упорів 100 мм виражається в характері тріщиноутворення та несучої здатності. Вже при рівні напружень 35-50% від руйнуючої, зафіксовані перші тріщини в центральній частині плити, а при навантаженні 70-80 кН, тріщини з'являються в місці кріплення і далі розвиваються за напрямом діагоналей. Розвиток напружень в металевому листі відбувається аналогічно серіям з кроком 50 мм. При навантаженні 70-80 кН максимальне значення деформацій між анкерами спостерігається в зразку

СПБ100 і становить 170-186 МПа. При рівні напружень 70-80% від руйнуючого в області деяких анкерних упорів виникають напруження, що відповідають межі текучості сталі. При досягненні навантажень 78-89% від несучої здатності, спостерігається значне розподілення тріщин в центральній частині.

Після завершення випробувань виконувалося розкриття конструкцій, що дало можливість оцінити цілісність бетону в області пустотоутворювачів і характер тріщиноутворення в розтягнутій зоні (рис. 9).

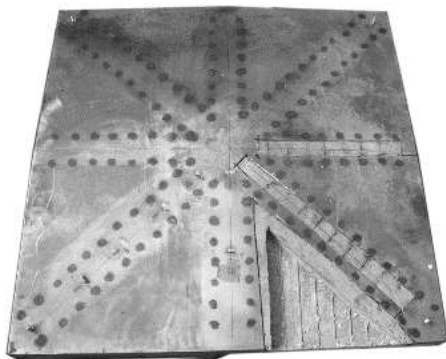


Рис. 9. Розкрита після випробувань пустота зразка СПБ50

Встановлено, що у всіх зразках зберігалася 100% працездатних анкерів з бетоном в їх області без ознак руйнування, що підтверджує припущення про відносне виключення відповідних секторів з роботи конструкції. Тріщиноутворення виражено в напрямку діагоналей і прямих, що проходять через середини сторін. При зростанні числа анкерних упорів в два рази, жорсткість

конструкції збільшується на 3-5%, а несуча здатність – на 11-15%.

В результаті порівняння експериментальних і теоретичних даних щодо несучої здатності, тріщиноутворення, схеми деформування та розподілу напружень, встановлено достатня збіжність отриманих результатів (табл.2).

Порівняння експериментальних та теоретичних значень несучої здатності сталобетонних плит розміром 100×100 см

Серія зразків	Витрата бетонної суміші, м ³	Економія бетонної суміші, м ³	Зниження власної ваги, %	Несуча здатність F _{lim(експ.)} , кН	Несуча здатність F _{lim(теор.)} , кН	Δ, %
СП50	0,07	—	—	150	145,8	2,8
СП100	0,07	—	—	135	128,4	4,8
СПМ50	0,06	0,009	14,3	150	144,3	3,8
СПМ100	0,06	0,009	14,3	130	125,7	3,4
СПБ50	0,056	0,012	20,6	145	143,2	1,24
СПБ100	0,056	0,012	20,6	130	123,8	4,8

Висновки з дослідження.

1. Розроблені нові елементи ефективних сталобетонних пустотних плит шляхом вставок пустотоутворювачів в тіло бетону.

2. Розроблені скінченно-елементні моделі сталобетонних пустотних плит перекриття і на їх підставі виконана оцінка напружено-деформованого стану.

3. Проведені експериментальні дослідження пустотних плит перекриття з різними за розмірами пустотами і змінним кроком анкерних упорів при дії статичного навантаження. В результаті чого встановлено:

- при утворення в бетоні перших тріщин, в сталевому листі в напрямку

діагоналей розвиваються напруження в діапазоні 45-57% від межі текучості;

- навколо анкерів рівень напружень вище на 20-35% в порівнянні з іншими точками, що лежать уздовж анкерних ліній.

4. Досліджена ступінь впливу пустот і піддатливості зв'язків по контакту бетону і сталі на граничний та напружено-деформований стан конструкції. В результаті чого встановлено:

- сталобетонні плити з пустотами зберігають свою несучу здатність у порівнянні зі своїми суцільними аналогами і при цьому дозволяють знизити власну вагу конструкції на 14-24%;

- при збільшенні числа анкерів в два рази жорсткість конструкції збільшується на 3-5%, а несуча здатність – на 11-15%.

Список використаних джерел

1. Лобяк О.В. Експериментальне дослідження роботи сталобетонного мембранного покриття з квадратним планом [Текст] / О.В. Лобяк // Зб.наук.праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип.45., С.128-135.

2. Чихладзе Э.Д. Напряженно-деформированное состояние сталобетонных плит [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №2. С.22-26.

3. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с внешним армированием [Текст] / Л.И. Стороженко – К.: УМКВО, 1989. – 99с.

4. Johnson R.P. Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings [Text] / R.P. Johnson // Blackwell Publishing: Wiley-Blackwell, 2004. – 252p.

5. Лобяк А.В. Моделирование работы сталобетонных пустотных плит перекрытия с учетом нелинейных свойств конструкции и материалов [Текст] / А.В. Лобяк, Д.В. Головки // Зб.наук.статей. Вип.11. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С.156-162.

6. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров – К.: изд. "Факт", 2007. – 394 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.А. Плугін

Лобяк Олексій Вікторович, к.т.н., доцент, кафедра Будівельна механіка та гідравліка, Український державний університет залізничного транспорту, тел.730-10-70, e-mail Lobiak@ukr.net

Головки Денис Валерійович, здобувач, кафедра Будівельна механіка та гідравліка, Український державний університет залізничного транспорту, тел.730-10-70, e-mail denis1235@ukr.net

A. Lobiak, cand. of techn. sciences, associate professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian state university of railway transport, tel.730-10-70, e-mail Lobiak@ukr.net