

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗБІРНО-МОНОЛІТНИХ ПЛИТНО-РЕБРИСТИХ КОНСТРУКЦІЙ НЕРОЗРІЗНИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТІВ З ТРІЩИНАМИ І ДО РУЙНУВАННЯ

© Сало В. Ю., Сало О. Ю., 2015

Наведено результати експериментальних досліджень, отриманих під час випробувань дослідних нерозрізних збірно-монолітних залізобетонних попередньо напружених мостів. Вперше в лабораторних умовах проведено експериментальні дослідження збірно-монолітних нерозрізних прогонових будов для перевірки прийнятих методів розрахунку з безпосереднім визначенням зусиль в елементах під час дії статичного навантаження. Випробування показали достатню жорсткість і міцність збірно-монолітних прогонових будов, які працювали в пружній стадії майже до розрахункового навантаження. Встановлено, що в результаті тріщиноутворення і пластичних деформацій проходить незначний просторовий перерозподіл зусиль між елементами прогонових будов. Перерозподіл залежить від зміни відношення жорсткостей окремих елементів системи. На підставі отриманих результатів запропоновано методику розрахунку міцності. Проведено порівняння експериментальних та теоретичних величин. Показано переваги і сферу використання розрахункового методу. Виділено характерні стадії напружено-деформованого стану. Виконано аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** збірно-монолітні конструкції, момент тріщиноутворення, згинальний момент, прогини, жорсткість.

The active provides the results of experimental reseach abtain in investigation of the testing multi – span prestressed reinforced concrete bridges. For the first time in the laboratory conditions were held experimental researches of prefabricated monolithic precast spans to check accepted methods of calculating the direct determination of efforts elements during the action of static load. Tests showed sufficient stiffness and strength of prefabricated monolithic spans working in an elastic phase, almost in the estimated load. It was found that as a result of cracking and plastic deformation there is negligible spatial redistribution of forces between of spans elements. On the basis of the got results the metnod of calculation of the strength. Comparison of experimental and theoretical sizes. Adrantages and area of the use of calculation metnod are snown. The chavacteristic stages of the tensely deformed state ave selected. The analysis of the got results of experimental reseaches is executed.

**Key words:** multi-span constructions, cracrning moment, bending moments, deflection, stiffness.

### Вступ. Постановка проблеми

Практика вітчизняного і закордонного будівництва доводить доцільність широкого застосування під час зведення мостів збірно-монолітного залізобетону, який поєднує основні переваги збірного і монолітного. Основна ідея збірно-монолітного перерізу полягає в тому, що найбільш відповідальні і трудомісткі елементи виготовляються індустріальним шляхом на заводах чи полігонах, а інша, менш складна монолітна частина, споруджується на місці. Однією з головних переваг збірно-монолітних конструкцій є можливість створення балкових прогонових будов статично невизначених систем з попередньо напруженою прогоною і надпорною арматурою порівняно простими методами.

Регулювання зусиль у поєднанні із зміною статичної схеми моста під час будівництва дають змогу одержати дуже економічну конструкцію за незначного ускладнення робіт з монтажу.

Особливості роботи збірно-монолітних прогонових будов – просторовість їх деформування, за якої основні елементи конструкції сприймають вплив складного напруженого стану [1–3]. Так діафрагми і плита проїзної частини розподіляють навантаження між головними балками. Своєю чергою, зусилля в зв'язках залежить від характеристик головних балок і розмірів плити проїзної частини. Під дією навантаження виникають тріщини і pojawiaються пластичні деформації бетону і арматури, які викликають зміну внутрішніх зусиль, визначених з умови пружної роботи всієї споруди, залежність між зовнішнім навантаженням і внутрішніми зусиллями стає нелінійною [4]. На цей час вже виконані численні дослідження окремих згинних нерозрізних залізобетонних балок, що мають тріщини в розтягнутій зоні, але мається порівняно мало досліджень залізобетонних нерозрізних прогонових будов на стадіях утворення і розвитку тріщин [1].

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Розрахункові зусилля для розрахунків на міцність в елементах статично невизначених залізобетонних конструкцій офіційними нормами [5] допускається визначати звичайними методами будівельної механіки за попередньо заданими розмірами перерізів елементів і в припущенні пружної роботи матеріалу. Водночас для кожного перерізу елемента одержане розрахункове зусилля порівнюється з несучою здатністю перерізу, визначеної з передумови пластичної роботи матеріалу. Так виникає невідповідність між визначенням зусиль і перевіркою січень.

У розрахунках нерозрізних прогонових будов з різними граничними умовами як основну систему приймають сукупність розрізних, прямокутних у плані прогонових будов з основними граничними умовами на опорах. Основна система є статично невизначена. Розрахунки можна поділити на дві основні частини:

- розкриття внутрішньої невизначеності (визначення зусиль і переміщень в основній системі);
- розкриття зовнішньої невизначеності.

Визначення зусиль і переміщень в основній системі – найбільш вантажомістка частина розрахунку. Методика розрахунку статично невизначених конструкцій з урахуванням перерозподілу зусиль ще не одержала повної і всебічної розробки. Поки що немає встановленої думки щодо використання наявних методів розрахунку, особливо для мостових конструкцій. Під час завантаження статично невизначеної залізобетонної конструкції окремі ділянки її елементів терплять низку якісних змін. На визначеному етапі в елементах конструкції виникають тріщини, зростає вплив непружних деформацій стиснутого бетону, жорсткість окремих ділянок конструкції знижується. Врахування змінних по довжині елементів значень жорсткостей, що уточнюються під час послідовних наближень, використовують в основному методи розрахунку споруд у пружно-пластичній стадії [6, 7].

Для сучасних тонкостінних конструкцій, виконаних із високоміцних матеріалів, визначальним для розмірів перерізів є не несуча здатність, а тріщиностійкість і деформативність. У цьому разі основну увагу звертають на визначення максимального значення навантаження, за якого задовольняються задані умови деформативності та тріщиностійкості конструкції [4]. Використовують також методи пружно-пластичних стержневих систем, оснований на дослідженні утворення пластичних шарнірів в елементах конструкції у міру наростання зовнішнього навантаження [1].

#### **Мета та задачі досліджень**

Просторовий характер роботи прогонових будов, їх деформування, приводять до того, що основні елементи конструкції перебувають під дією складного напруженого стану. Використання вдосконалених методів розрахунку, що враховують просторову роботу прогонових будов, дає змогу точніше визначити напружено-деформований стан конструкції, оцінювати вплив на неї розвитку тріщин, пластичних деформацій і інших факторів, точніше встановлювати правдиві запаси міцності і використовувати найекономічніші.

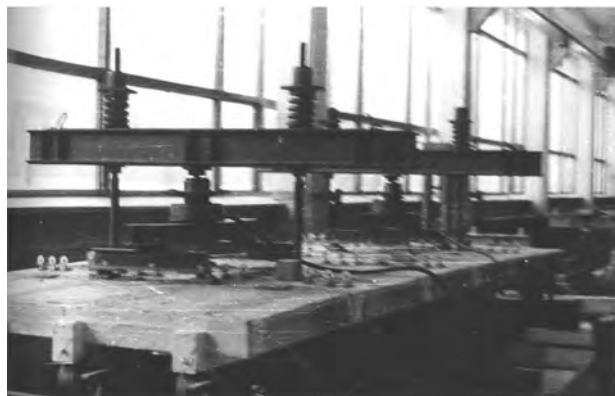
Допущення обмеженого розвитку пластичних деформацій у найбільш завантажених балках дає змогу повніше використати резерви міцності інших (сусідніх балок) і в цьому разі можна поставити вимоги до поперечних зв'язків у питанні недопущення в них пластичних деформацій з метою забезпечення надійної сумісної роботи головних балок [8, 9]. Подальший розвиток методу

розрахунку статично невизначених залізобетонних конструкцій пов'язаний з необхідністю встановлення на основі ціленапрявленого оброблення численних експериментальних даних, що наявні в дослідників, узагальнення законів деформування елементів залізобетонних конструкцій, що перебувають в одноосному, плоскому і об'ємному напруженому стані. З цією метою під час випробувань дослідних зразків прогонових будов виконувати такі завдання:

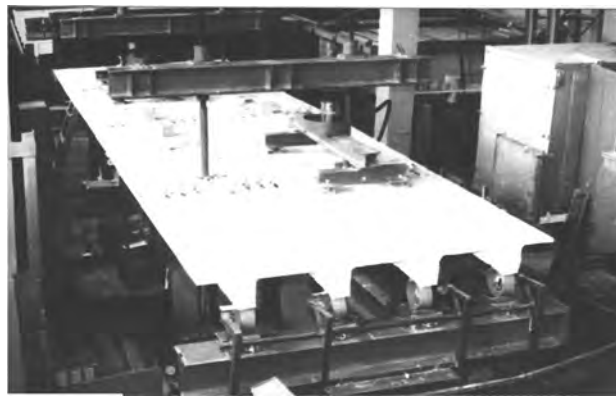
- виявлення умов використання результатів випробувань масштабних дослідних зразків для моделювання прогинів згинних реальних залізобетонних конструкцій з тріщинами;
- вибір методики розрахунку прогонових будов з урахуванням тріщин і непружних деформацій залізобетону, що дають результати найближчі до експериментальних даних на всіх стадіях роботи конструкцій.

### Експериментальні дослідження

Для експериментальної перевірки роботи елементів розробленої конструкції збірно-монолітних нерозрізних прогонових будов з метою одержання точних даних для розрахунків міцності, жорсткості, тріщиностійкості, розподілу тимчасового навантаження в прольоті, оцінки надійності конструкції на стадіях експлуатації і до руйнування, а також встановлення характеру її руйнування проведено випробування дослідних двопролітних нерозрізних прогонових будов з довжиною по 3 м. Дослідні конструкції прогонових будов у попередньо-напруженому залізобетоні прийняті у відношенні 1:5 до натурних розмірів і відстань між головними балками становить 50 см. У двох базових зразках по балках змонтовані збірні залізобетонні ребристі плити і після замонолічення одержали прогонові будови з діафрагмами (НМ-2х3-1, НМ-2х3-2). Третя дослідна конструкція складається із збірних попередньо напружених балок і монолітної плити проїзної частини без діафрагм (НМ-2х3-3).



*Фото 1. Загальний вид випробування нерозрізної прогонової будови з діафрагмами*



*Фото 2. Загальний вид випробування нерозрізної прогонової будови без діафрагмами*

Для випробування статичним навантаженням розроблено стенд з поперечними рамами, які є опорами прогонових будов. Опирання балок прогонових будов на опори прийнято через кільцеві динамометри.

Випробування на статичні навантаження проводили гідравлічними домкратами ДГ-50, ДГ-25 за допомогою траверс і тяг, закріплених до силової плити стенду. Навантаження передавалось через чотири майданчики і прикладувалось ступенями по 10 кН.

Під час випробування дослідних зразків збірно-монолітних прогонових будов замірялись опорні реакції, осідання опор, прогини в середині прольотів, деформації бетону і попередньо напруженої арматури в елементах конструкцій. На першому етапі на конструкцію діяли одиничними вантажами, прикладеними в місцях пересічення поздовжніх і поперечних балок для побудови поверхонь впливу (перший етап). На другому етапі конструкції завантажували по трьох різних схемах за однакового навантаження в прольотах до появи перших тріщин на опорі. На третьому етапі конструкції завантажували до появи перших тріщин у прольоті. За різних навантажень у прольотах конструкції доводили до руйнування (четвертий етап). Одночасне завантаження двох прольотів забезпечувалось створенням тиску в домкратах ДГ-25 і ДГ-50 однією насосною станцією.



Фото 3. Характер тріщиноутворення в дослідній конструкції нерозрізної прогонової будови з діафрагмами

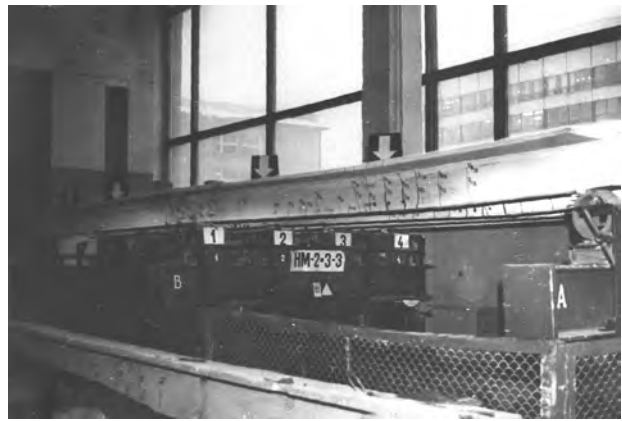


Фото 4. Характер тріщиноутворення в дослідній конструкції нерозрізної прогонової будови без діафрагми

Випробування дослідного зразка НМ-2х3-1 до руйнування проводили у разі не вигідного розміщення навантаження над середніми балками. В середніх балках тріщини появились за навантаження 64,0 кН. У разі навантаження 73,4 кН ширина їх розкриття становила 0,1 мм. Перші тріщини в опорному перерізі появились за загального навантаження в прольоті 20,7 кН. За навантаження 24,0 кН ширина їх розкриття становила 0,05–0,1 мм. Після зняття навантаження всі тріщини закривались.

У момент руйнування прольоту В-С навантаження в прольотах було відповідно: в прольоті В-С-132.2 кН, в прольоті А-В-65.5 кН. Руйнування конструкції пройшло від текучості арматури в середніх балках. Значно розкрились тріщини під вантажними майданчиками, а також появились тріщини в крайніх балках. У крайніх балках появились похилі тріщини біля опор В і С, а також тріщини по поздовжньому шву замоноличення і по поперечних балках. По верху прогонової будови тріщини розміщались по контуру прикладення навантаження.

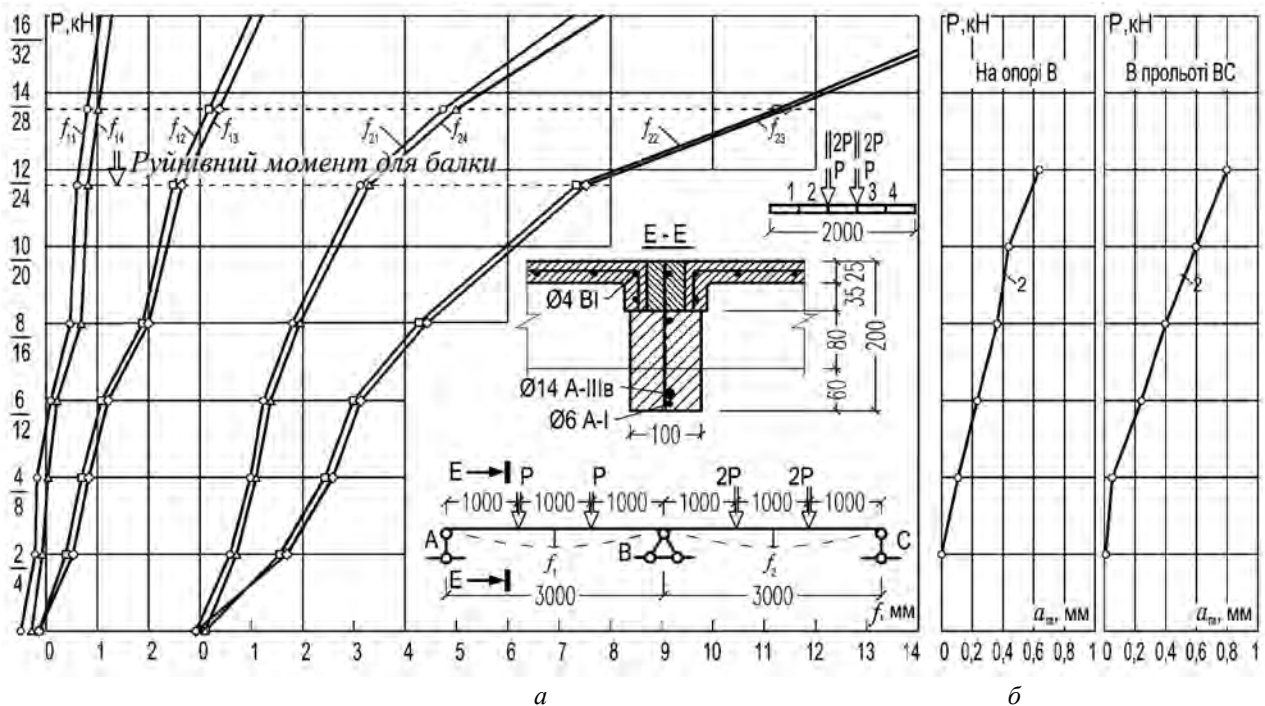


Рис. 1. Графіки прогинів і ширини розкриття тріщин нерозрізної прогонової будови М-2х3-1:  
а – схема випробування і епюри експериментальних прогинів;  
б – фактичне розкриття тріщин

Дослідна конструкція НМ-2х3-2 була випробувана до руйнування за невідгідного розміщення навантаження для крайніх балок. Тріщини появились у крайніх балках за загальних навантажень 51,8 кН. У разі навантаження 61,2 кН ширина їх розкриття 0,1 мм. Перші тріщини в опорному перерізі появились за загального навантаження в прольоті 16,0 кН. Під час навантаження 20 кН ширина їх розкриття становила 0,05–0,1 мм. У момент руйнування прольоту В-С навантаження в прольотах було відповідно: в прольоті В-С – 129,4 кН, а в прольоті А-В – 64,7 кН. Руйнування конструкції пройшло від текучості арматури в крайній балці, під вантажними майданчиками, а також появились тріщини в решті поздовжніх балках. По плиті прогонової будови тріщини розміщались по контуру прикладення навантаження.

Випробування дослідного зразку НМ-2х3-3 проводили до руйнування під час завантаження крайніх балок в обох прольотах з різними значеннями навантаження. Вертикальні тріщини шириною 0,05 мм утворились у балці 2 за величини навантаження 53,2 кН. У момент руйнування прольоту А-В навантаження в прольоті А-В дорівнювала 127,2 кН, а в прольоті В-С – 63,6 кН. Руйнування конструкції відбувалось через текучість арматури в балці 2 і руйнування плити під вантажною площадкою. В балці 3 ширина розкриття тріщин у момент руйнування становила 0,20 мм, а в балці 4 тріщини так і не появились. По верху прогонової будови ширина розкриття тріщини були 0,80 мм і розміщались вони по контуру ділянки зони прикладення навантаження. Під час дослідження зразки НМ-2х3-3 перші видимі тріщини на опорі появились по плиті між балками у разі навантаження 31,2 кН за величини 38,1 кН ширина їх розкриття становила 0,05–0,1 мм.

У результаті проведених експериментальних досліджень конструкцій збірно-монолітних нерозрізних прогонових будов з діафрагмами і без них до руйнування одержано дані про характер тріщиноутворення, напрямки розвитку тріщин, ступені їх розкриття залежно від положення і величини навантаження.

Випробування показали, що перші поздовжні тріщини в нижніх волокнах плити збірно-монолітної прогонової будови без діафрагм появились за навантаження на 10–12 % менше, ніж у діафрагмових. За такого навантаження появились поперечні тріщини в плиті біля проміжної опори. За центрального завантаження із зменшенням жорсткості плити після появи тріщин проходило збільшення згинальних моментів у середніх балках і зменшення в крайніх, що свідчить про взаємозв'язки з головними балками і участі в розподілі навантаження між балками. Наявність діафрагм вплинула на розвиток поздовжніх тріщин, обмеження довжини їх розповсюдження в зонах близьких до них. Інтенсивність роботи діафрагм збільшується після виникнення тріщин у плиті. У разі об'єднання по плиті і діафрагмах прогонові будови мають більшу вертикальну жорсткість. За поперечного обтиску діафрагм прогонові будови по своїй роботі наближаються до монолітного перерізу.

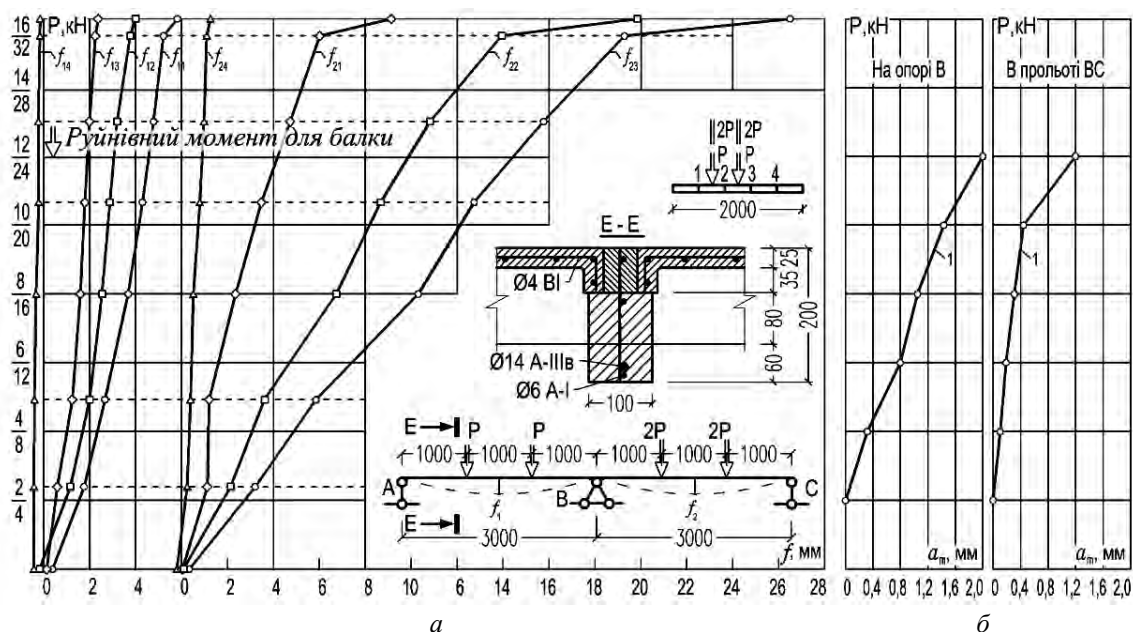


Рис. 2. Графіки прогинів і ширини розкриття тріщин нерозрізної прогонової будови М-2х3-2: а-схема випробування і епюри експериментальних прогинів; б-фактичне розкриття тріщин.

Зіставлення величин прогинів у середині прольотів засвідчує вдалий збіг між розрахунковими і експериментальними значеннями.

Із графіків видно, що різниця в прогинах збірно-монолітних прогонових будов з діафрагмами і без них незначна. За експериментальними даними за відсутності діафрагм найбільші ординати прогину збільшились на 4–7 %.

Результати випробувань і розрахунку дослідних зразків нерозрізних прогонових будов різними методами [10, 11] дає змогу зробити висновок, що величини експериментальних і теоретичних зусиль у головних балках відрізняються до 7–9 %, що свідчить про достатню жорсткість дослідних конструкцій.

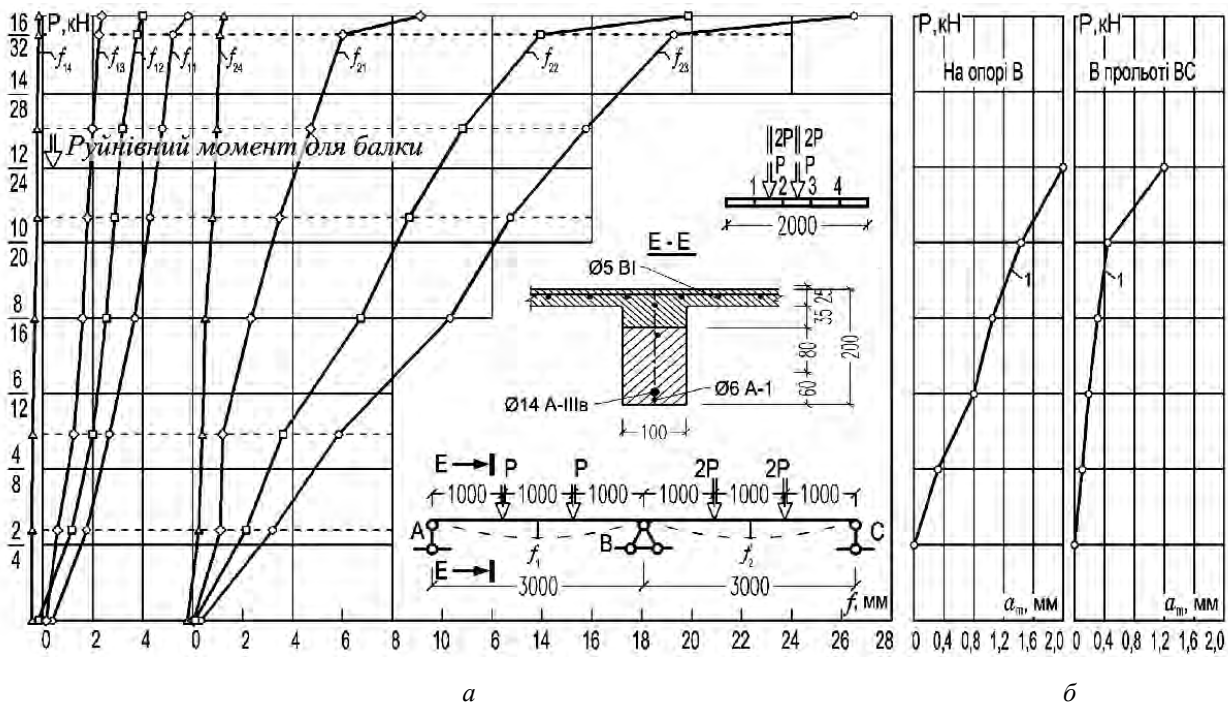


Рис. 3. Графіки прогинів і ширини розкриття тріщин нерозрізної прогонової будови М-2х3-3: а – схема випробування і епюри експериментальних прогинів; б – фактичне розкриття тріщин

Загальний характер розподілу зусиль по поперечному перерізі збірно-монолітних прогонових будов аналогічний у більшості методів розрахунку.

Сучасні вимоги до проектування залізобетонних прогонових будов мостів передбачають виконання розрахунків з мінімальним відступом від дійсних умов роботи конструкцій під час експлуатації з урахуванням особливостей їх виготовлення і монтажу. У зв'язку з цим методи розрахунку враховують просторову роботу конструкції, багатадійність її зведення, вплив довготривалих процесів, а також вплив регулювання і попереднього напруження.

Основний напрям у проектуванні залізобетонних мостових конструкцій – це подальше наближення проектних розробок з використанням нових методів проектування до дійсних умов роботи конструкцій з одночасним покращенням техніко-економічних показників споруди. Значною мірою це питання вирішено на основі таких теоретико-конструктивних принципів проектування: 1) суміщення функцій з урахуванням просторової роботи направлено на повнішу реалізацію несучої здатності всіх елементів системи; 2) компоновка прогонових будов з урахуванням просторової роботи, основана на вивченні особливостей взаємодії елементів просторових конструкцій.

### Висновки

1. Вперше в лабораторних умовах проведені експериментальні дослідження збірно-монолітних нерозрізних прогонових будов для перевірки прийнятих методів розрахунку з безпосереднім визначенням зусиль в елементах під час дії статичного навантаження.

2. Випробування показали достатню жорсткість і міцність збірно-монолітних прогонових будов, які працювали в пружній стадії майже до розрахункового навантаження. Встановлено, що в результаті тріщиноутворення і пластичних деформацій проходить незначний просторовий перерозподіл зусиль між елементами прогонових будов. Перерозподіл залежить від зміни відношення жорсткостей окремих елементів системи.

3. Метод плитно-балкових конструкцій, що ґрунтується на рішеннях прикладної теорії пружності і використаний у цьому дослідженні вирішує всі питання просторової роботи, набуваючи розрізної прогонової будови як основної системи.

4. Узагальнення експериментальних даних дає змогу більше розвинути методіку розрахунку нерозрізних прогонових будов мостів, елементів конструкцій яких перебувають під дією складного напруженого стану.

1. *Расчет железобетонных мостов / Г. М. Власов и др. ; под ред. К. К. Яковсона. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1977. – 352 с.* 2. *Гибшман М. Е. Проектирование транспортных сооружений / М. Е. Гибшман. – М. : Транспорт, 1980. – 391 с.* 3. *Гийон Н. Предварительно напряженный железобетон. Статически неопределимые конструкции / Н. Гийон. – М. : Госстройиздат, 1962. – 495 с.* 4. *Леонгардт Ф. Предварительно напряженный железобетон / Ф. Леонгардт; пер. с нем. В. Н. Гаранина. – М. : Стройиздат, 1983. – 246 с.* 5. *ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. – 52 с.* 6. *Дыховичный А. А. Статически неопределимые железобетонные конструкции / А. А. Дыховичный. – К. : Будівельник, 1978. – 108 с.* 7. *Гвоздев А. А. О перераспределении усилий в статически неопределимых железобетонных обычных и предварительно напряженных конструкциях / А. А. Гвоздев. – М. : Госстройиздат, 1958.* 8. *Потапкин А. А. Пространственный расчет пролетных строений мостов с поперечными связями / А. А. Потапкин // Труды Союздорнии. – 1964. – Вып. 2.* 9. *Улицкий Б. Е. Пространственные расчеты балочных мостов / Б. Е. Улицкий. – М. : Автотрансиздат, 1962. – 180 с.* 10. *Семенец П. В. Пространственные расчеты плитных мостов / П. В. Семенец. – К. : Вища школа, 1976. – 164 с.* 11. *Гибшман М. Е. Теория расчета мостов сложных пространственных систем / М. Е. Гибшман. – М. : Транспорт, 1973. – 200 с.*