

УДК 624.004.69

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОБОТИ ПЕРЕХРЕСНО-РЕБРИСТОЇ ПРОЛЬОТНОЇ БУДОВИ НА ВЕЛИКОРОЗМІРНІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ МОДЕЛІ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SPATIAL WORK OF CROSS-RIB FLIGHT STRUCTURE ON A LARGE-SIZED REINFORCED CONCRETE MODEL

Яо Сінь, аспірант, Кваша В.Г., д.т.н., проф. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Yao Xin, PhD student, Saliychuk L.V., Kvasha V.G., doctor of technical sciences, Professor.(National University Lviv Polytechnic, Lviv)

Представлена конструкція великорозмірної залізобетонної моделі перехресно-ребристої балкової прольотної будови, під час випробувань якої досліджували особливості просторової роботи та закономірності розподілу навантаження між балками поперек та уздовж прольоту. Експериментально виявлені відмінності в роботі окремих балок моделі у пружній та пружно-пластичній стадії їх роботи.

The design of a large-scale reinforced concrete model of a cross-ribbed beam span structure is presented. During the experiment , the peculiarities of spatial work and regularities of load distribution between beams across and along the span were investigated. Experimentally revealed differences between the elastic and elastoplastic stages of each beam of the model.

It is experimentally confirmed that in the elastic-plastic stage of work the bending moments in such beams will be 25-30% less than during the elastic work of those beams, this is the hidden load capacity of cross-ribbed span structures, which must be taken into account when recalculating span structures on the new normalized temporary loads A15 and NK100 based on <Typical Project №56>.

Ключові слова: залізобетонна великорозмірна модель, прольотна будова, випробування, просторова робота.

Reinforced concrete large-scale model, span structure, tests, spatial work.

Постановка проблеми Мета роботи. Моделювання під час дослідження складних залізобетонних конструкцій, до яких відносять прольотні будови мостів, являється вельми ефективним методом одержання

найбільш повної достовірної інформації про досліджувану конструкцію, більшої ніж під час випробування натурних конструкцій.

Моделювання під час дослідження роботи під навантаженням мостових конструкцій дозволяє за мінімальних затрат матеріалів, трудомісткості і вартості експериментально виявити характер зміни напружено-деформованого стану, встановити якісну і кількісну картину розподілу зусиль між елементами прольотної будови та її дійсну розрахункову схему і перевірити правомірність покладених в основу розрахунку гіпотез [2,3,4,7].

Для дослідження деформативності й характеру тріщиноутворення в складних просторових конструкціях прольотних будов використовують моделі, виготовлені з матеріалу, аналогічного до матеріалу натурної конструкції, наприклад, дрібнозернистого бетону [1...4,7]. Доцільно також проводити паралельно випробування малих моделей з пружних матеріалів і великих з матеріалу, подібного до натурної конструкції [5,6]. Одержана таким способом інформація більш достовірна і дозволяє взаємний контроль.

Експериментальні дослідження просторової роботи великорозмірної моделі проводили разом з дослідженнями пружних малорозмірних моделей стосовно збірних діафрагмових прольотних будов з залізобетонних балок за ТП вип. 56. Саме цей тип прольотних будов, збудованих у великій кількості в 50-60-тих роках 20 ст., в даний час потребує перерахунків для більш точного визначення величини і просторового розподілу зусиль та виявлення прихованих резервів вантажопідйомності, а також встановлення необхідності їх підсилення для забезпечення умов подальшої нормальної експлуатації.

Тому метою даної роботи було експериментальне дослідження на великорозмірній залізобетонній моделі просторової роботи перехресно-ребристої балкової прольотної будови у пружній стадії її роботи, а також за фізичної нелінійності деформування

Конструкція та виготовлення дослідних конструкцій - ДК, характеристики матеріалів. Дослідна конструкція ДК-0 представляє собою окрему балку моделі прольотної будови (рис. 1, а), а зразок ДК-1 моделював у масштабі 1:4 балкову прольотну будову за ТП вип. 56 з розрахунковим прольотом 16,2 м і шириною, між осями крайніх балок $1,4 \times 5 = 7$ м (рис. 1, б). Її проектували за принципом повної геометричної подібності до реальної прольотної будови (рис. 1).

Дослідні конструкції ДК-0, ДК-1 виготовляли в дерев'яній опалубці в умовах відкритого полігону заводу ЗБВ з дрібнозернистого бетону класу В25. Склад бетону 1:1,32:3,65 при В/Ц=0,41...0,5. Щебінь фракції 5...15 мм, пісок кварцовий, середньої крупності. Цемент портландський активністю 480...510 кгс/см² (витрата на 1 м³ бетону 382 кг). Бетонування проводили з ручним укладанням бетону і послідуєчим ущільненням віброголкою.

Фізико-механічні характеристики матеріалів:

Кубова міцність $R = 30,9$ МПа; призмova міцність $R_b = 21,5$ МПа; міцність

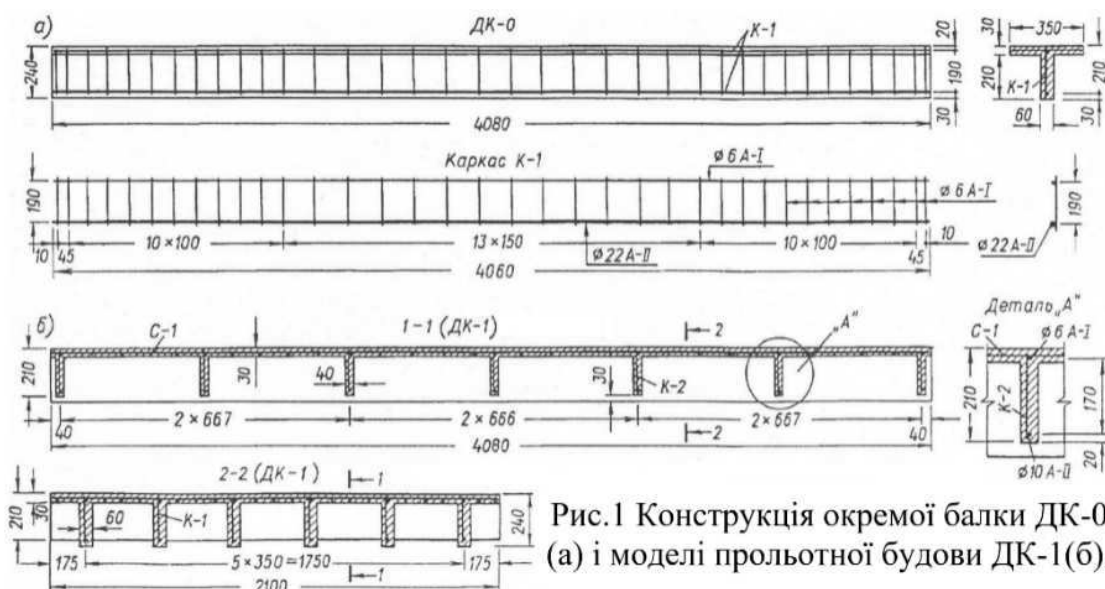


Рис.1 Конструкція окремої балки ДК-0 (а) і моделі прольотної будови ДК-1(б).

на осьовий розтяг $R_{bt} = 1,63 \text{ МПа}$; початковий модуль пружності бетону $E_b = 2,92 \times 10^4 \text{ МПа}$; межа текучості арматури Ф22 А-II - $\sigma_y = 308 \text{ МПа}$; модуль пружності арматури Ф22 $E_s = 20,7 \times 10^4 \text{ МПа}$.

Методика випробувань і аналізу просторової роботи моделі прольотної будови ДК-1. Дослідну конструкцію ДК-1 випробовували в приміщенні лабораторії на випробувальному стенді, який забезпечував навантаження зосередженою силою у будь-якій точці моделі. Модель встановлювали на інвентарні опори і опорні частини, висотне положення яких регулювали гвинтами. На опорах між кожним поздовжнім ребром і опорними частинами встановлювали зразкові динамометри ДОСМ-3 (ДОСМ-5), якими вимірювали опорні реакції кожної поздовжньої балки моделі. Модель навантажували зосередженою силою, яку прикладали почергово в кожному вузлі перетину поздовжніх і поперечних ребер. Навантаження здійснювали домкратом через навантажуючий пристрій. Його величину контролювали зразковим динамометром ДОСМ-5.

Під час випробувань вимірювали прогини балок у кожному вузлі перетину поздовжніх і поперечних ребер. Для цього використовували індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм, які кріпили тримачами, закріпленими на спеціальній жорсткій рамі.

Навантаження збільшували ступенями, доводячи його до нормативного, яке відповідало максимальному розкриттю тріщин 0,25...0,3 мм. На кожній ступені навантаження витримували 15 хвилин, після чого знімали відліки з приладів, вели спостереження за тріщиноутворенням і переносним мікроскопом вимірювали ширину розкриття тріщин.

Окремі балки випробовували одночасно з випробуванням моделей також на силовому стенді. Навантаження на балки у вигляді зосередженої сили почергово прикладали в тих же перерізах уздовж прольоту, які в моделях відповідали вузлам перетину поздовжніх і поперечних діафрагм (тобто, в 1/2; 1/3; 1/6 прольоту). В усіх точках почергового прикладання сили

вимірювали прогини і деформації бетону на рівні центру ваги нижньої розтягнутої арматури і зверху полиці.

Аналіз просторової роботи моделі полягав в експериментальному вивченні розподілу зовнішнього вузлового навантаження між її балками, тобто визначенні частки зовнішнього навантаження, яка передається на кожну поздовжню балку за одержаними експериментальними даними:

- Прогинами балок прольотної будови у вузлах перетину поздовжніх і поперечних ребер.
- Реакціями опор балок прольотної будови при всіх схемах її навантаження зосередженою силою.
- Прогинами і деформаціями окремої балки (еталонної) при тих же, що і при випробуваннях моделі, схемах її навантаження.

За цими експериментальними даними ординати епюр поперечного розподілу зовнішньої сили між балками можна одержати кількома способами, а саме:

1. За вимірними опорними реакціями балок, якщо прийняти, що сума опорних реакцій кожної балки моделі складає ту частку зовнішньої зосередженої сили, яку сприймає ця балка. Наприклад, якщо модель навантажена силою P , розміщеною над крайньою балкою в середині прольоту (рис.2,а), то з умов статички частка сили, яку сприйме балка 1 буде складати $P_1 = \sum R_1$, балка 2 $P_2 = \sum R_2$, і т.д. (рис.2,в).

2. За експериментальними прогинами балок моделі, припускаючи, що розподіл прогинів від сили P пропорційний розподілу зусиль між балками від цієї ж сили, тобто: $P_1 = P f_{1,3} / \sum f_i$; $P_2 = P f_{2,3} / \sum f_i$

Де $f_{1,3}$ і $f_{2,3}$ - прогини балок 1, 2 в розглянутому перерізі; $\sum f_i$ - сума прогинів усіх балок моделі в тому ж перерізі (рис. 2, б).

3. Безпосереднім зіставленням прогинів окремої (еталонної) балки з прогинами таких же балок складі прольотної будови при однакових схемах їх навантаження (рис. 2,д), виходячи з умови, що однаковим прогинам еталонної балки і балок моделі відповідають однакові сили, які припадають на ці балки. Таким чином, одержавши експериментально графік прогинів окремої балки (залежність $M - f$, або $P - f$), навантаженої за тією ж схемою, що і балки моделі (рис.2,д) і, маючи вимірні прогини таких же балок у складі моделі, за графіком легко знайти ту частину сили P (згинального моменту M), яка передається на ці балки (рис.2,д). Якщо прогин балки 1 у складі моделі $f_{1,3}$, то за графіком рис.2,д йому відповідає згинальний момент M , (або частка сили P). Аналогічно знаходимо частки сили P , які сприймають інші балки прольотної будови. У результаті одержимо експериментальну епюру розподілу зусиль між балками поперек прольоту при заданому положенні зовнішньої сили.

У цьому способі, основаному на прямому порівнянні роботи еталонної балки з роботою такої ж балки у складі прольотної будови, прийнята дійсна

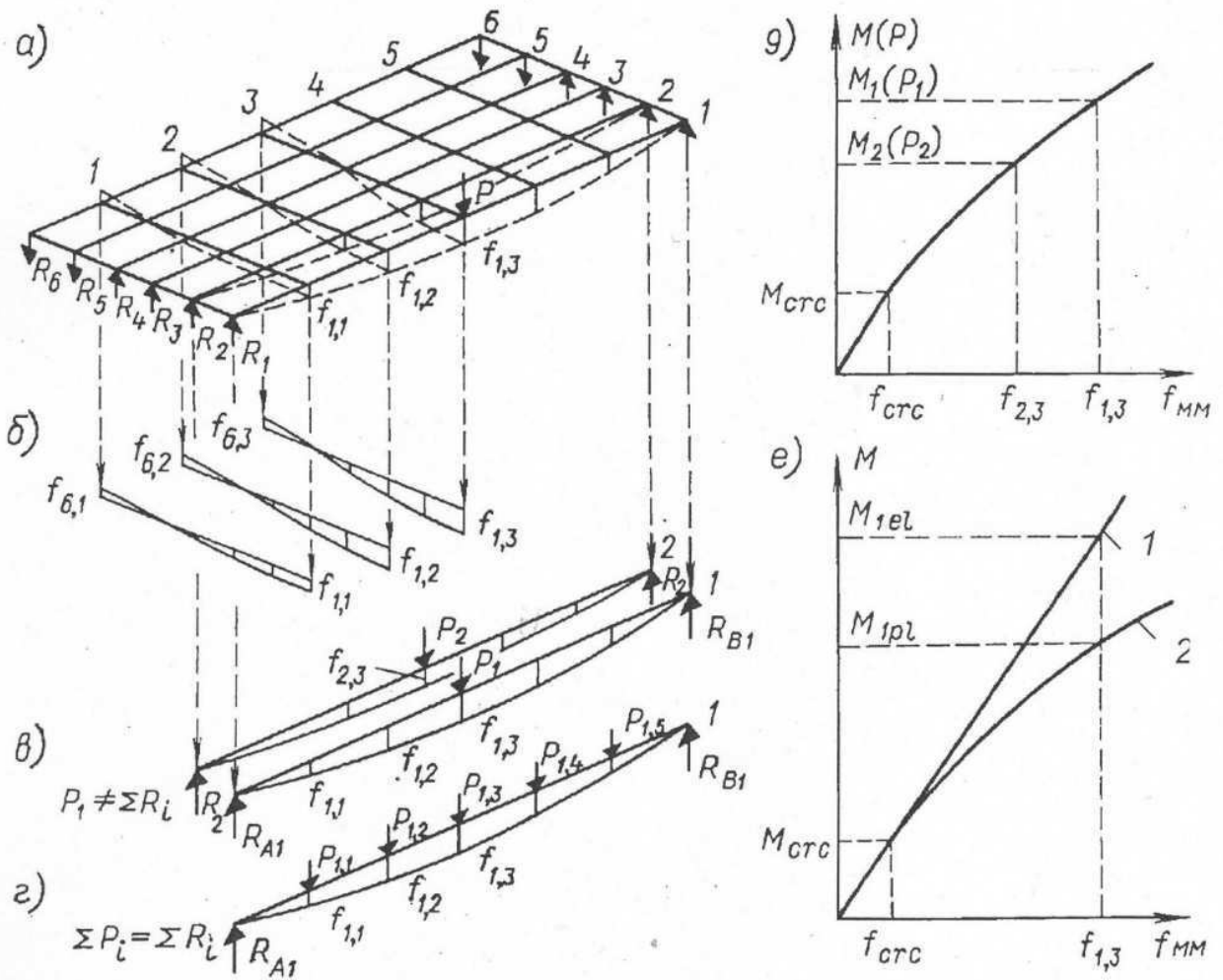


Рис. 2. До аналізу просторової роботи перехресно-ребристої прольотної будови при розподілі зовнішньої сили P різними способами:

а — схема перехресно-ребристої системи, навантаженої силою P над кожною балкою в середині прольоту; б, в — епюри прогинів балок уздовж і поперек прольоту; г — дійсна схема навантаження і прогини балки 1 при розподілі сили P у вузлах перехресно-ребристої системи при її роботі у пружно-пластичній стадії; д- графік прогинів окремої (еталонної) балки; е- графік прогинів у пружній(1) і пружно-пластичній(2) стадіях роботи

для залізобетонної балки залежність між прогином і зусиллям, одержана з врахуванням наявності тріщин, непружних деформацій бетону і повторності дії навантаження. Тому вплив цих факторів автоматично враховується у визначенні просторового розподілу зусиль і аналізі просторової роботи випробуваної залізобетонної моделі.

Потрібно зауважити, що величини зусиль в балках прольотної будови, одержані цим способом, будуть меншими, ніж попередніми. Це видно з порівняння графіків прогинів при пружній (1) і пружно-пластичній (2) роботі еталонної балки (рис.2,е). При пружній роботі прогинові $f_{1,3}$ відповідає зусилля M_{1el} , а такому ж прогинові при роботі балки у пружно-пластичній

стадії – зусилля M_{1pl} , яке завжди буде меншим від зусилля M_{1el} . Наведене порівняння очевидно свідчить про те, що наявність тріщин і нелінійних деформацій впливає на розподіл зусиль між поздовжніми балками і позначається на загальній просторовій роботі прольотної будови.

Слід також відмітити, що при аналізі випробувань за описаною методикою з використанням експериментальних прогинів еталонної балки було виявлено, що частина більше навантажених балок, які працюють у пружно-пластичній стадії, внаслідок просторового розподілу зовнішньої сили P навантажені не однією силою P_1, P_2, \dots , прикладеною по лінії її дії (рис.2,в), а системою сил, прикладених уздовж прольоту балок у вузлах їх перетину з діафрагмами (рис.2,г).

Аналіз результатів випробувань моделі перехресно-ребристої прольотної будови. Для якісної і кількісної оцінки характеру просторової роботи моделі ДК1 використані результати її випробувань, а також випробувань окремих балок ДК-0. Вони представлені епюрами прогинів вузлів моделі уздовж і поперек прольоту, а також графіками прогинів цих же вузлів в залежності від величини і положення зовнішнього навантаження. Як приклад, на рис.3 показані епюри і графіки прогинів моделі ДК-1.

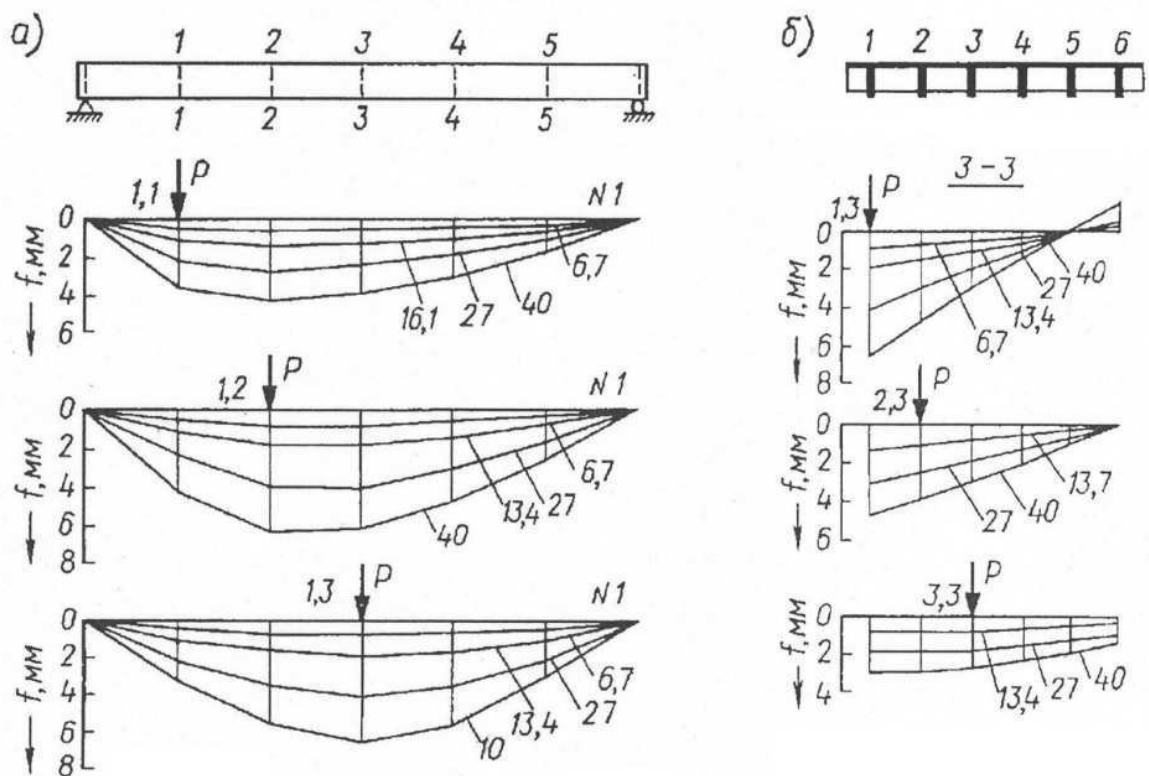


Рис.3 Епюри прогинів уздовж(а) і поперек(б) прольоту балок моделі ДК-1 при різних схемах вузлового навантаження

Оскільки в процесі випробувань динамометрами вимірювали опорні реакції балок моделі, то слід було очікувати, що визначені за графіком прогинів еталонної балки в перерізі під силою частки зовнішньої зосередженої сили, що сприймають окремі балки моделі, будуть дорівнювали

сумі опорних реакцій цих же балок. Насправді виявилось, що для тих балок моделі, які працюють з тріщинами, вони були значно меншими від суми відповідних опорних реакцій (рис.2,в). Лише у балках, віддалених від точки прикладання зовнішньої сили і працюючих при згинальних моментах, менших від моменту утворення тріщин (тобто, в пружній стадії), визначені за цими графіками частки сил і суми опорних реакцій збігались. .

Якщо виходити із загально прийнятих уявлень статички, одержана з експериментів розбіжність часток сили, яку сприймають найбільше навантажені балки з сумою опорних реакцій можна пояснити лише тим, що сила, прикладена в розглянутому перерізі балки (наприклад, для крайньої балки 1 сила P , на рис.2,в), є лише однією з системи сил, якими в дійсності навантажена ця балка.

Таким чином, з порівняльних випробувань моделі прольотної будови і окремих еталонних балок виявлено, що при прикладанні до моделі однієї зосередженої сили P (рис.2,а), частина її балок буде навантажена не однією силою P . (рис.2,в), а декількома, прикладеними у вузлах перетину поздовжніх балок з діафрагмами (рис.2,г). У цьому випадку умова рівноваги, наприклад, для крайньої балки буде $\sum P_i = R_{a1} + R_{b1}$ ($\sum P_i$ - сума сил, якими навантажена дана балка уздовж прольоту). г. Одержані результати випробувань свідчать про те, що поперечний розподіл зовнішнього навантаження між частиною балок прольотної будови проходить не тільки у тому поперечному перерізі моделі, в якому прикладена зовнішня сила P , але і в суміжних з ним вліво і вправо до опор у вузлах перехресно-ребристої системи. При пружній схемі роботи перехресної системи сила P розподіляється між балками лише у тому перерізі, в якому вона прикладена.

Наступний аналіз показав, що просторовий розподіл зовнішнього зосередженого вузлового навантаження P є наслідком його перерозподілу через зменшення початкової жорсткості поздовжніх балок прольотної будови під силою і в прилягаючій до неї зоні і включенні в роботу поперечних балок.

Оскільки після утворення тріщин розподіл прогинів між балками не пропорційний розподілу зусиль, то експериментальні згинальні моменти в балках моделей у вузлах їх перетину з діафрагмами визначали за описаною вище методикою з використанням відкорегованих розрахунком графіків прогинів окремої балки в координатах $M - f$ при навантаженні різних вузлів зосередженою силою. Маючи побудовані в такий спосіб експериментальні епюри згинальних моментів, за відомою методикою для кожної балки знаходили поперечні сили, а також частки сили P , що передаються у вузли уздовж прольоту балок моделей внаслідок її просторового розподілу.

Як приклад, на рис.4,а показані епюри M і Q , а також схеми і величини вузлових сил для крайньої і другої від краю балок моделі ДК-1 при навантаженні зосередженою силою $P=40,3\text{кН}$ її крайньої балки, а на рис.4,б наведені аналогічні дані при навантаженні в середині прольоту другої балки.

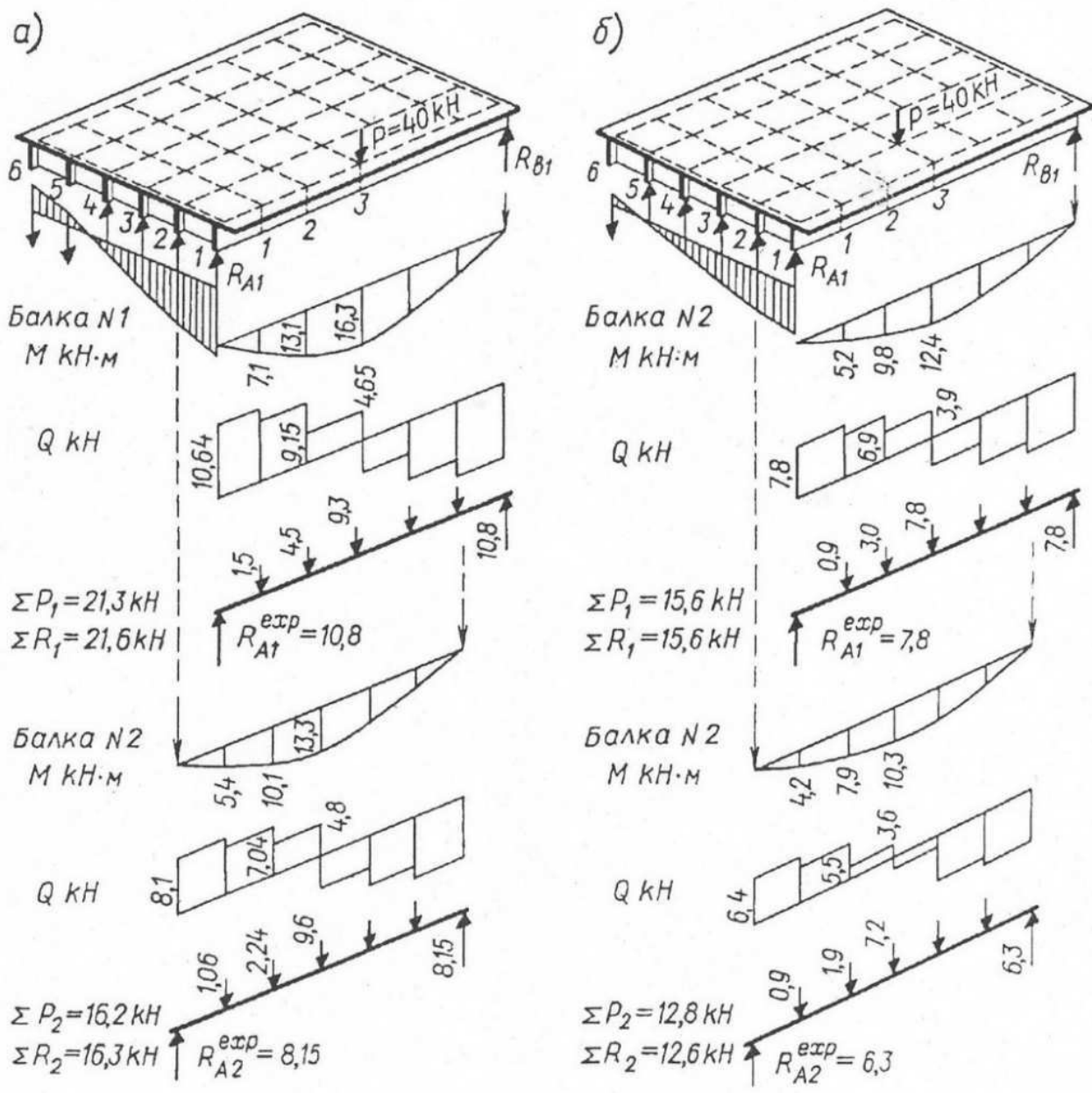


Рис.4. Експериментальні епюри згинальних моментів, поперечних і вузлових сил у балках 1 і 2 моделі ДК-1 при навантаженні силою $P=40,3 \text{ kH}$ балок 1(а) і 2 (б) в середині прольоту.

Достовірність визначення експериментальних значень M , Q і P_i , контролювали за збіжністю суми сил P_i , якими навантажена дана балка моделі, з сумою її опорних реакцій, виміряних при випробуваннях. З наведених даних видно, що для всіх балок моделі має місце задовільна збіжність суми визначених сил (ΣP_i) з сумою опорних реакцій (ΣR_i).

В цілому наведений приклад переконливо свідчить про те, що при роботі залізобетонних прольотних будов у пружно-пластичній стадії існує ефект просторового розподілу зовнішнього навантаження і за рахунок цього суттєво зменшення згинальних моментів у перерізах балок (особливо найбільше навантажених). З практичної точки зору це явище є важливим,

оскільки врахування його в просторових розрахунках дає можливість на 25-30% зменшити розраховані зусилля від тимчасових навантажень і таким чином виявити резерв їх вантажопідйомності. Насамперед це важливо для великої групи існуючих діафрагмових прольотних будов за ТП вип.56, в яких врахування під час їхперерахунку просторового розподілу тимчасових навантажень у пружно-пластичній стадії роботи збільшує несучу здатність на 25-30%, що дозволить здійснювати подальшу експлуатацію без підсилення існуючих прольотних будов, які за пружним розрахунком мають недостатню несучу здатність і потребують підсилення. Крім того, наявність резерву вантажопідйомності слід також враховувати і під час реконструкції прольотних будовданого типу.

Висновки.

1. Моделювання являється ефективним методомдослідження просторової роботи балкових прольотних будов і може більш широко застосовуватись під час виконання таких досліджень замість більш складних натурних випробувань прольотних будов.

2. Випробування залізобетонної моделі підтвердили пружно-пластичний характер роботи частини найбільше навантажених балок і внаслідок цього зменшення у них згинальних моментів на 25-30%, що є прихованим резервом вантажопідйомності реальних перехресно-ребристих прольотних будов даного типу.

3. Випробування моделі виявили основні закономірності просторової роботи, а саме: в залежності від місцеположення зовнішнього навантаження, співвідношення жорсткостей балок і жорсткості з'єднань між ними поперек прольоту ступінь навантаженості окремих балок є різним, тому частина з них, більше навантажених, працює у пружнопластичній стадії, а друга частина менш навантажених - у пружній.Причому, в залежності від схеми зовнішнього навантаження ці зони є взаємозмінними. Тому пошук найбільш невідповідних схем навантаження з умови максимальної навантаженості балок у складі прольотної будови повинен бути однією з основних цілей просторового розрахунку.

4. Спосіб експериментального визначення розподілу між балками згинальних моментів і поперечних сил з порівняння прогинів окремих (еталонних) балок і аналогічних балок у складі моделей з урахуванням невідповідності схем навантаження окремо випробуваних балок (однією зосередженою силою) і балок моделей (системою сил у вузлах їх перетину з діафрагмами) є значно точнішим, ніжтрадиційний спосібвизначення зусильпропорційно прогинам і початковим жорсткостям балок у припущені їх пружної роботи після утворення тріщин.

1. Дыховичный А.А. Моделирование при исследовании сложных железобетонных конструкций. /А.А. Дыховичный, А.М. Дубинский// Строительные конструкции. – К.:Будівельник, 1972. ВВП– с.159-164.

Дыkhovychный А.А. Modelyrovanye pry yssledovanyu slozhnykh zhelezobetonnykh konstruktsyi. /А.А. Дыkhovychный, А.М. Dubynskiy// Stroytelnye konstruktsyy. – К.:Budivelnik, 1972. ВЬР– s.159-164.

2. Золотов П.В., Пастушенко А.Г. Экспериментальные исследования железобетонного пролетного строения до и после реконструкции на модели. /П.В. Золотов, А.Г. Пастушенко// Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов. – Минск: БелдорНИИ. 1985 - с.154-176.

Zolotov P.V., Pastushenko A.H. Eksperymentalnye yssledovaniya zhelezobetonnoho proletnoho stroeniya do y posle rekonstruktsyy na modely. /P.V. Zolotov, A.H. Pastushenko// Stroytelstvo y ekspluatatsiya avtomobylnykh doroh y mostov. – Mynsk: BeldorNYU. 1985 - s.154-176.

3. Кваша В.Г. Экспериментальні дослідження залізобетонних моделей прольотних будов, розширених приставними елементами /В.Г. Кваша// Друга всеукраїнська наук.-техн. конф. Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону. К.:НДІБК, 1999.- Вип.50. - с.87-94.

Kvasha V.H. Eksperymentalni doslidzhennia zalizobetonnykh modelei prolotnykh budov, rozshyrenykh prystavnymy elementamy /V.H. Kvasha// Druha vseukrainska nauk.-tekhn. konf. Naukovo-praktychni problemy suchasnoho zalizobetonu. K.:NDIBK, 1999.- Vyp.50. - s.87-94.

4. Кваша В.Г. Дослідження просторової роботи перехресно- і плитно-ребристих прольотних будов на великорозмірних залізобетонних моделях. /В.Г.Кваша// Вісник Львівського державного аграрного університету Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Львів: АДАУ, 2007.-№8. - с.182-192.

Kvasha V.H. Doslidzhennia prostоровoi roboty perekhresno- i plytno-rebrestykh prolotnykh budov na velykorozmirnykh zalizobetonnykh modeliakh. /V.H.Kvasha// Visnyk Lvivskoho derzhavnoho ahrarnoho universytetu Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. – Lviv: ADAU, 2007.-№8. - s.182-192.

5. Лантух-Лященко А.И., Страхова Н.Е. Экспериментальные исследования пространственной работы бездиафрагменного пролетного строения. /А.И. Лантух-Лященко, Н.Е. Страхова// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.:Будівельник, 1973.-Вип. XXII. - с.101-103.

Lantukh-Liashchenko A.Y., Strakhova N.E. Eksperymentalnye yssledovaniya prostranstvennoi raboty bezdyafrahmennoho proletnoho stroeniya. /A.Y. Lantukh-Liashchenko, N.E. Strakhova// Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo. – К.:Budivelnik, 1973.-Vyp. XXII. - s.101-103.

6. Страхова Н.Е. Исследования работы реконструируемых автодорожных железобетонных балочных мостов. /Н.Е. Страхова// Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.23.15 – М:МАДИ, 1978. - 21с.

Strakhova N.E. Yssledovaniya raboty rekonstruyruemykh avtodorozhnykh zhelezobetonnykh balochnykh mostov. /N.E. Strakhova// Avtoreferat dys... kand. tekhn. nauk: 05.23.15 – M:MADY, 1978. - 21s.

7. Юргенсон А.О. Учет совместной работы балочных систем в железобетонных конструкциях. /А.О. Юргенсон//дис. канд. техн. наук: 05-23.01 – Львов;ЛПИ, 1955.- 162с.

Yurhenson A.O. Uchet sovместnoi raboty balochnykh system v zhelezobetonnykh konstruktsyiakh. /A.O. Yurhenson//dys. kand. tekhn. nauk: 05-23.01 – Lvov;LPY, 1955.- 162s.