

УДК 624.012.69.059

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ
МОДЕЛЕЙ БАЛОК ПРОЛЬОТНИХ БУДОВ З РЕБРИСТОЮ
НАКЛАДНОЮ ПЛИТОЮ***

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕШНОЙ
РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ С
РЕБРИСТОЙ НАКЛАДНОЙ ПЛИТОЙ**

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF JOINT WORK OF SPAN STRUCTURES
BEAMS MODELS WITH SUPERIMPOSED RIBBED PLATE**

**Стечишин С.М., ст. викл., (Національний університет “Львівська
політехніка”, м. Львів)**

**Стечишин С.М., ст. препод., (Национальный университет “Львовская
политехника”, г. Львов)**

Stechyshyn S.M., senior lecturer, (National University “Lviv Polytechnic”, Lviv)

**Представлені результати випробувань моделей мостових балок
складеного перерізу: несуча здатність нормальних і похилих перерізів,
жорсткість і прогини, а також описаний характер розподілу зсувних
зусиль уздовж прольоту.**

**Представлены результаты испытаний моделей мостовых балок
составного сечения: несущая способность нормальных и наклонных
сечений, жесткость и прогибы, а также описан характер распределения
усилий смещения вдоль пролета.**

**The results of bridge composite beams model testing such as: carrying
capacity of the midspan and endspan cross sections, rigidity and deflections
are presented, as well as the character of the distribution of shifting efforts
along the span are described.**

Ключові слова:

**Міст, плита, модель, балка, підсилення, стик, об'єднання, шпонка, прогин,
деформація, несуча здатність, переріз, зсув.**

**Мост, плита, модель, балка, усиление, стык, объединение, шпонка, прогиб,
деформация, несущая способность, сечение, смещение.**

* Робота виконана під керівництвом д.т.н., проф. Кваші В.Г.

Bridge, plate, model, beam, strengthening, junction, consolidation, key, deflection, deformation, carrying capacity, section, shift.

1. Постановка задачі, мета і програма випробувань. При розширенні і підсиленні прольотних будов мостів плоскою або ребристою накладною плитою, вкладеною зверху існуючих балок і об'єднаною з ними для сумісної роботи, отримуються балки складеного поперечного перерізу. Включення в роботу з існуючими балками накладної плити покращує просторовий розподіл навантаження між елементами старої прольотної будови з одночасним збільшенням жорсткості і несучої здатності останніх. Найкращий ефект підсилення досягається при використанні ребристої накладної плити [1, 2], що дозволяє збільшити висоту старих балок і компенсувати збільшення зусиль від власної ваги самої плити.

Утворені в такий спосіб складені балки мають ряд особливостей, які впливають на характер їх роботи під навантаженням. В першу чергу це включення в роботу накладної плити за допомогою дискретних зв'язків у вигляді жорстких або гнучких анкерів, закріплених на верхній полиці існуючих балок в місцях обпирання на них ребер накладної плити. На напружено-деформований стан і жорсткість комплексної системи "існуюча балка - накладна плита" впливають зсуваючі і відриваючі зусилля, що виникають в дискретних зв'язках, а також ступінь податливості анкерів. Вплив зазначених факторів на сумісну роботу балок і накладної плити можна оцінити тільки експериментально. Тому з метою дослідження сумісної роботи існуючих балок з ребристою накладною плитою проведені випробування моделей в масштабі 1:4 залізобетонних балок таврового перерізу, виділених зі складу плитно-ребристої прольотної будови, до і після об'єднання з ребристою накладною плитою за допомогою високоміцних болтів і залізобетонних шпонок з гнучкими арматурними анкерами.

Програма випробувань передбачала:

- вивчити напружено-деформований стан, жорсткість і тріщиноутворення основної балки (без накладної плити) на стадії експлуатаційних навантажень;
- дослідити зміну напружено-деформованого стану, міцність нормальних і похилих перерізів, жорсткість і тріщиностійкість таких же балок, об'єднаних з накладною плитою;
- вивчити вплив розташування зовнішнього навантаження на роботу складеної балки (прикладання навантаження до полиці накладної плити і полиці існуючої балки) і повторних навантажень на зміну напружено-деформованого стану, жорсткості та деформацій зсуву на різних стадіях роботи балки при обох схемах розташування навантаження;
- дослідити деформативність і несучу здатність на зсув болтових і шпоноквих дискретних з'єднань і особливостей їх роботи вздовж балки;

- вивчити характер руйнування складених балок та несучу здатність їх нормальних і похилих перерізів. Встановити ступінь збільшення міцності і жорсткості балки складеного перерізу порівняно з основною за рахунок включення в роботу накладної плити.

2. Конструкція експериментальних зразків. Експериментальні зразки складених балок (рис. 1) представляли собою комплексну конструкцію, зібрану з основної балки (рис. 1, а) і П-подібних елементів ребристої накладної плити (рис. 1, б), вкладених зверху і об'єднаних болтовими (рис. 1, в) або шпонковими (рис. 1, г) дискретними зв'язками.

Основна балка таврового перерізу прольотом 4,0 м, висотою 24 см, шириною полиці 35 см і товщиною полиці 3 см армована поздовжньою арматурою в ребрі $\varnothing 22$ А-III з границею текучості $\sigma_y = 39,8$ МПа і поперечною $\varnothing 6$ А-I з кроком 100 мм і 150 мм. Основні балки виготовляли в дерев'яній опалубці касетного типу з дрібнозернистого бетону, який на момент випробувань мав такі характеристики: кубова міцність – $R = 30,6$ МПа, призмова міцність – $R_b = 20,8$ МПа, міцність на осьовий розтяг – $R_{bt} = 2,35$ МПа. Початковий модуль пружності бетону балок – $E_b = 30200$ МПа. Елементи ребристої накладної плити мали висоту 10 см і розміри в плані 35×52 см. Полиця накладної плити армована арматурою $\varnothing 4$ Вр-I ($\sigma_y = 486$ МПа) з Г-подібними випусками для об'єднання окремих плит в швах замоноличення. Плити виготовляли в металевій опалубці з дрібнозернистого бетону з кубовою міцністю $R = 25$ МПа, призмовою міцністю $R_b = 18,5$ МПа і міцністю на осьовий розтяг $R_{bt} = 1,98$ МПа.

Моделі складених балок збирали в такій послідовності. Після встановлення основної балки на опори випробувального стенду і випробування її до експлуатаційного рівня навантаження зверху полиці балки на шар цементного розчину товщиною 15...20 мм складу 1:2 встановлювали фрагменти ребристої накладної плити. Випуски арматури суміжних плит об'єднували і шви між ребрами накладної плити замоноличували дрібнозернистим бетоном класу В35. При їх замоноличенні в кожному шві залишали два круглих отвори для встановлення болтів, які були виготовлені з арматури класу А-III $\varnothing 16$ мм. Після тужавіння бетону замоноличення, що проходило в природних умовах на протязі 28 діб, болти натягували зусиллям 10 кН на болт з фіксацією його гайками і передачею зверху стика замоноличення і знизу полиці основної балки через металеві пластини розмірами 55×45×5 мм. Таким чином кожен стик накладної плити і основної балки обтискали зусиллям 20 кН. Отвори під болти після їх натягу не ін'єктували і з'єднання працювало на зріз за рахунок сил тертя та зчеплення розчину і бетону замоноличення з поверхнею полиці основної балки. Після натягу болтів балки витримували на випробувальному стенді без навантаження на протязі 4-х місяців. Повторна перевірка зусилля натягу в болтах перед початком випробувань показала, що в середньому воно становило 10 кН на болт.

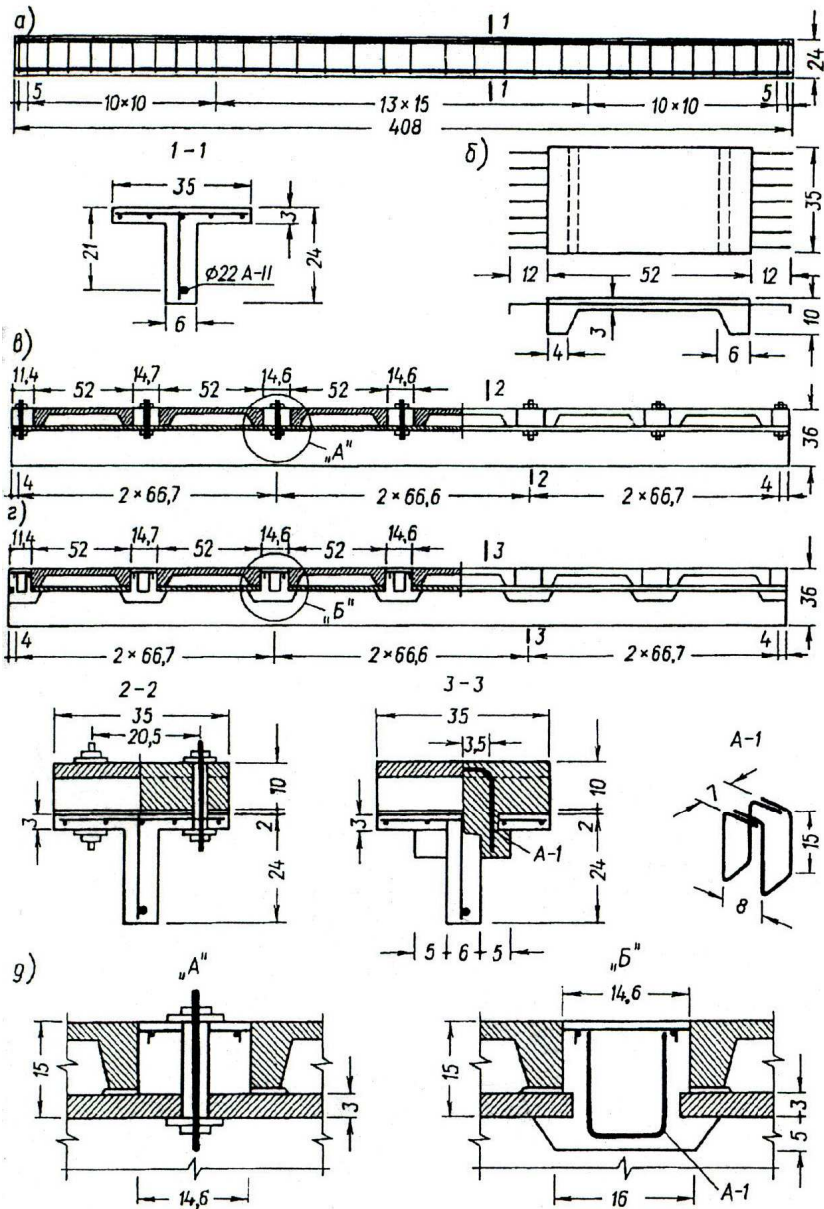


Рис. 1. Конструкція експериментальних зразків складених балок: а – основна балка; б – збірні елементи накладної плити; в – складена балка з болтовим з'єднанням накладної плити; г – складена балка з шпонковими з'єднаннями накладної плити; д – деталі та вузли.

В експериментальних зразках з об'єднанням шпонками (рис. 1, г, д) в полиці існуючих балок пробивали вікна розмірами 10×10 см з кроком рівним відстані між осями поперечних швів замоноличення накладних плит. Після встановлення фрагментів накладних плит і гнучких арматурних анкерів А-1 вікна і шви замоноличували одночасно.

Моделі балок за геометричною подібністю відповідали реальним мостовим балкам прольотних будов з розрахунковим прольотом 16,2 м.

3. Методика проведення випробувань. Відповідно до поставлених завдань випробування балок проводили в три етапи. Спочатку основну балку (1) без накладної плити випробовували зосередженою силою прикладеною в середині прольоту (рис. 2, а). Балку навантажували до рівня експлуатаційного навантаження, прийнятого 50% від передбаченого руйнівного. Його досягнення відповідало ширині розкриття тріщин 0,15...0,20 мм. Другий етап (після влаштування накладної плити) включав випробування складеної балки за такими схемами:

- схема 1 – навантаження, як і основної балки, одною силою в середині прольоту до досягнення 50% від теоретичного руйнівного навантаження;
- схема 2 – навантаження у вигляді чотирьох сил прикладали зверху накладної плити в перерізах, співпадаючих із швами замоноличення. За цією схемою було проведено 7 циклів “навантаження - розвантаження” ступенями, рівними 0,03...0,05 від передбаченого руйнівного, до максимального навантаження, що відповідає реальній інтенсивності навантаження прольотних будов тимчасовим навантаженням 0,35...0,4 від руйнівного;
- схема 3 – 10 циклів навантаження через систему розподільчих траверс прикладали в восьми перерізах зверху полиці основної балки. В цьому випадку з'єднання не підлягало дії додаткових притискуючих зусиль.

На третьому етапі випробувань балки доводили до руйнування за звичайною методикою випробувань короточасним ступенево зростаючим навантаженням, прикладеним за другою схемою, більш не вигідною як для роботи накладної плити, так і її з'єднань з основною балкою.

За описаною методикою були випробувані дві балки складеного перерізу з болтовим об'єднанням накладної плити і одна зі шпонковим об'єднанням.

4. Результати випробувань моделей мостових балок складеного перерізу. Результати випробувань оцінювали за експериментальними даними про розвиток прогинів і деформацій балок на різних стадіях навантаження, за характером тріщиноутворення і руйнування, а також за дослідною несучою здатністю нормальних і похилих перерізів. Ефект впливу накладної плити на роботу основних балок виявляли безпосереднім порівнянням результатів випробувань до і після включення її в роботу.

4.1. Аналіз прогинів і деформацій дослідних балок. При навантаженні балки чотирма силами (схема 2 на рис. 2, а) на рівні навантаження 0,35...0,4 від руйнівного прогин склав 4,2 мм для 1-го і збільшився до 5,4 мм для 7-го циклу навантаження. Навантаження цієї ж балки вісьмома силами за схемою

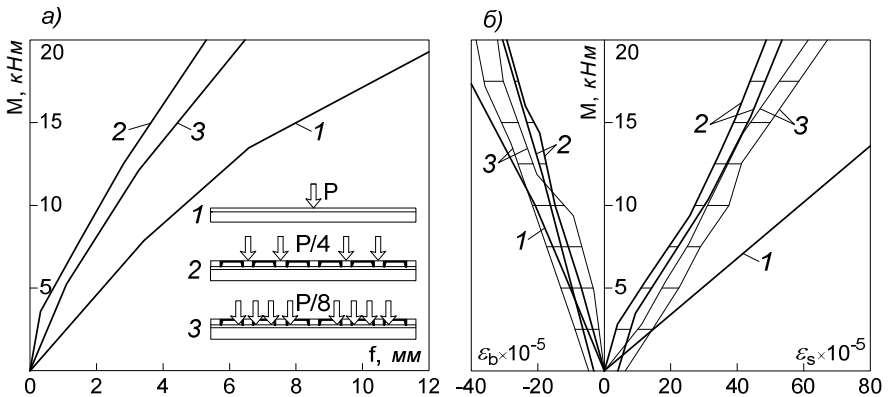


Рис. 2. Графіки прогинів (а) і деформацій арматури і бетону (б) основних балок та балок складеного перерізу при різних схемах навантаження (1, 2, 3).

3 призвело до збільшення прогину при 1-му навантаженні до 6,95 мм, а при 10-му – до 8,8 мм. Таким чином місцезрештування зовнішнього навантаження вплинуло на роботу складеної балки. З графіків рис. 2а видно, що при випробуваннях за схемою 3 прогини балки наростали інтенсивніше, і їх величина була на $18 \pm 25\%$ більшою, ніж при схемі навантаження 2. Включення в роботу накладної плити істотно вплинуло на прогини порівнюваних балок. При рівні навантаження основної балки 0,5 від руйнівного її прогин був 7,98 мм, а при цьому ж навантаженні складеної балки став 3,76 мм при навантаженні за схемою 2 і 4,76 мм при навантаженні за схемою 3, тобто зменшення прогинів складо відповідно 2,12 і 1,68 рази. Наростання прогинів за ступенями навантаження в залежності від числа циклів його прикладання носить згасаючий характер. При прикладанні перших 4...5 циклів на рівні 0,35...0,4 від руйнівного спостерігали їх збільшення і стабілізацію до 7-го циклу.

Порівняно з основною балкою деформації арматури після включення в роботу накладної плити зменшились в 2,0 рази при завантаженні за схемою 2 і в 1,87 рази за схемою 3. Зменшення деформацій стиснутої полиці становило відповідно 1,53 і 1,43 рази (рис. 2, б).

Розподіл деформацій по висоті об'єднаного перерізу балок близький до лінійного (рис. 3). Це свідчить про те, що

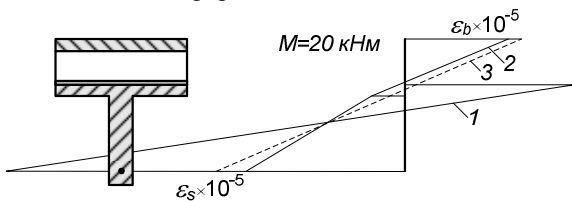


Рис. 3. Епюри деформацій арматури і бетону основної балки і балки складеного перерізу.

робота складеного поперечного перерізу на стадії експлуатаційних навантажень відповідає гіпотезі плоских перерізів, а накладна

плита надійно включається в сумісну роботу з основною балкою і напружено-деформований стан складеного перерізу в стадії експлуатаційних навантажень близький до відповідного стану суцільного перерізу. Внаслідок включення в роботу накладної плити і збільшення загальної робочої висоти складеного перерізу нейтральна вісь піднімається і уже при експлуатаційних навантаженнях в зоні максимальних згинальних моментів проходить вище верху полиці основної балки. При цьому полиця існуючої балки виключається з роботи на стиск, що з практичної точки зору важливо, оскільки бетон полиці старих балок існуючих прольотних будов в значній мірі уражений корозією і через це ослаблений. Передача стискаючих зусиль на нову полицю накладної плити призводить до зміцнення стиснутої зони балок і підвищення їх довговічності.

Виключення з роботи полиці існуючих балок значно спрощує розрахунки міцності і деформацій складених балок. При розміщенні нейтральної осі в проміжку між полицями основної балки і накладної плити плече внутрішньої пари сил можна приймати як відстань від центра ваги розтягнутої арматури до центра ваги полиці накладної плити: $z = h_0 - 0,5h'_{f1}$.

4.2. Деформації зсуву в дискретних зв'язках накладної плити з основною балкою. На стадії експлуатаційного навантаження (0,3...0,4 від руйнівного для основної балки) деформації зсуву болтових з'єднань зовсім незначні і при обох схемах навантаження становили 0,004...0,007 мм після 7...10 циклів навантаження, а при навантаженнях 0,5...0,7 від руйнівного збільшились до 0,042...0,18 мм (рис. 4, а). Починаючи з інтенсивності навантаження 0,7 і до руйнування деформації зсувів розвивались більш інтенсивно. Однак, до руйнування розладнання болтових з'єднань не настало і вони забезпечували зв'язок накладної плити з основною балкою.

Балка зі шпонковим об'єднанням поводи́ла себе аналогічно. На стадії експлуатаційних навантажень деформації зсуву в шпонкових з'єднаннях при навантаженні за схемою 2 не перевищували 0,004 мм, а при навантаженні 0,5...0,7 від руйнівного були також малими (0,015...0,043 мм). Істотне їх збільшення зафіксоване при навантаженні балки за схемою 3: при експлуатаційних навантаженнях до 0,149 мм, а при 0,5...0,8 від руйнівних – 0,211...0,491 мм. Перед руйнуванням балки зрізалась найбільш навантажена друга від її торця шпонка.

Розподіл деформацій зсуву вздовж прольоту нерівномірний. Найбільші деформації зсуву відмічені не в опорному з'єднанні накладної плити з балкою, де поперечна сила максимальна, а на приопорній ділянці в другому від торця балки стику накладних плит. Деяко меншими вони були в опорному перерізі і різко зменшувались до середини прольоту, де наближались до нуля.

Одержана з експериментів епюра зсуваючих деформацій (а відповідно і зусиль) суперечить відомій формулі залежності між зсуваючою і поперечною силами: $F=QSa/I$. Згідно з цією формулою максимальне зсуваюче зусилля

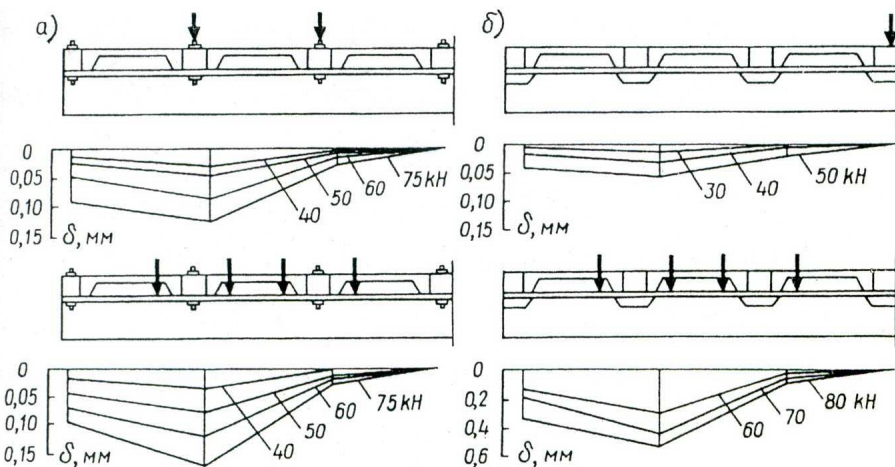


Рис. 4. Епюри деформацій зсуву в дискретних зв'язках складених балок з болтовими (а) і шпонковими (б) з'єднаннями при різних схемах їх навантаження.

повинно виникати в опорному перерізі і йому повинні відповідати максимальні деформації зсуву. З експериментів одержана інша картина: переріз з максимальними зсувами не збігається з перерізом з максимальною поперечною силою. При навантаженні складеної балки зі шпонковими з'єднаннями одною зосередженою силою в середині прольоту (рис. 4, б) поперечна сила на довжині півпрольоту постійна і відповідно до зазначеної формули слід очікувати однакових деформацій зсуву в дискретних зв'язках на половині прольоту. Однак, отримана епюра зсувних деформацій аналогічна як і для балок, випробуваних системою сил за схемами завантаження 2 і 3. При навантаженні цієї самої балки системою сил також одержана епюра зсувних деформацій з максимальною ординатою в другому від її торця з'єднанні (рис. 4, б).

4.3. Характер руйнування та несуча здатність нормальних і похилих перерізів. Прийнята в експериментальних зразках конструкція болтового і шпонкового з'єднання забезпечила роботу накладної плити і основної балки до руйнування, яке у всіх випробуваних балках настало одночасно в нормальному і похилому перерізах і супроводжувалось розкриттям нормальних і похилих тріщин до 2,5...3,0 мм, безперервним наростанням прогину, який при максимально досягнутому загальному навантаженні 122 кН ($P/8=15,25$ кН) становив приблизно 7,5...9,3 см (тобто близько або дещо більше 1/50 прольоту). Характерною особливістю руйнування зразків з болтовим з'єднанням (рис. 5, а) був місцевий відрив полиці основної балки разом з прилеглою ділянкою накладної плити від ребра основної балки зліва в зоні другого від її торця з'єднання. Горизонтальна тріщина відриву була продовженням похилої тріщини, в якій настало руйнування припорної

ділянки ребра балки. Ця похила тріщина виникла в ребрі балки в межах першої від лівої опори секції накладної плити при навантаженні 0,75...0,8 від руйнівного. Вона розвивалась вгору до низу полиці основної балки і розповсюдилась уздовж її нижньої грані, переходячи в тріщину відриву. Відрив полиці супроводжувався місцевим її продавлюванням під шайбами болтових з'єднань.

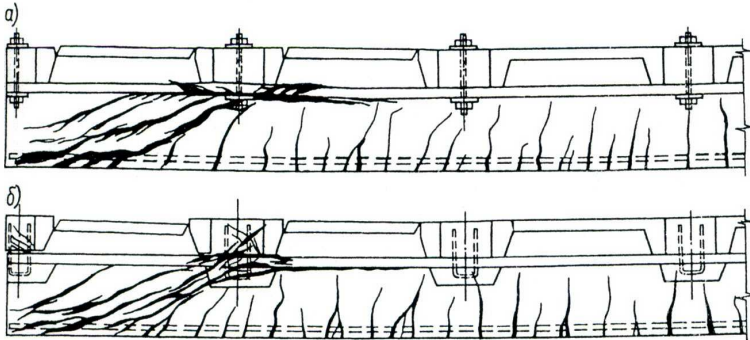


Рис. 5. Характер руйнування складених балок з болтовими (а) і шпонковими (б) з'єднаннями.

Слід відмітити специфіку роботи і характер руйнування полиці накладних плит на приопорній ділянці. При навантаженні 0,75...0,8 від руйнівного в місцях примикання полиці накладної плити до ребер (перша і друга від лівої опори накладної плити) виникли поперечні тріщини і їх подальше розкриття супроводжувалось поворотом плит в вертикальній площині таким чином, що в примиканні до лівого (в сторону опори) ребра тріщина розкривалась зверху, а в примиканні до правого (в сторону прольоту) – знизу.

Характер руйнування на приопорній ділянці балки з шпонковими з'єднаннями був таким: спочатку при загальному навантаженні 90 кН ($P/8=11,25$ кН) зрізалась друга від торця шпонка, потім пройшло відділення накладної плити від основної балки і руйнування в похилій тріщині, яка перетинала ребро основної балки, її полицю і розповсюдилась вгору до замоноличеного стика накладних плит (рис. 5, б). Потім зрізалась крайня надпорна шпонка, що супроводжувалось розкриттям похилих тріщин до 2,5...3,0 мм, безперервним наростанням прогину і текучістю поздовжньої арматури. Балка зруйнувалась при загальному навантаженні 95 кН ($P/8=11,88$ кН). Фактична несуча здатність нормального перерізу складених балок була в 1,72...2,0 рази більшою порівняно з несучою здатністю основної балки. Це свідчить про можливість значного підсилення нормальних перерізів існуючих балок прольотних будов після включення в роботу накладної плити. Випробування показали, що до руйнування вони працюють загальним перерізом і розрахунок їх несучої здатності можна виконувати за загальною умовою розрахунку міцності нормальних перерізів суцільних балок:

$M_u = A_s \sigma_y z$. Розрахунок несучої здатності за цією формулою дає добру збіжність з експериментальними результатами.

Значно менший ефект збільшення несучої здатності випробуваних складених балок за поперечною силою. Порівняно з основною балкою вона збільшується лише в 1,16...1,25 рази, що свідчить про значно менший вплив накладної плити на міцність похилих перерізів. Одержане в експериментах її збільшення можна віднести в запас і виконувати їх розрахунок за діючими нормами з введенням в розрахункові формули робочої висоти основної балки без врахування висоти накладної плити.

Висновки. 1. Проведені випробування моделей балок складеного перерізу підтвердили ефективність використання ребристої накладної плити для збільшення несучої здатності нормальних перерізів і жорсткості існуючих балок прольотних будов. Фактична несуча здатність нормального перерізу складених балок була в 1,72...2,0 рази більшою порівняно з несучою здатністю основної балки. Несуча здатність за поперечною силою збільшилась лише в 1,16...1,25 рази.

2. Включення в сумісну роботу з основною балкою накладної плити в зоні дії максимальних моментів змінює положення нейтральної осі, що в свою чергу веде до виключення з роботи, як правило, дефектної полиці існуючих балок і сприйняття стискуючих зусиль полицею накладної плити. Це дозволяє в необхідній мірі підсилити стиснуту зону існуючих балок і збільшити їх довговічність.

3. Повторне навантаження в кількості до 10 циклів інтенсивністю 0,35...0,4 від руйнівного істотно не вплинуло на роботу складеної балки. При прикладанні перших 4...5 циклів спостерігали деяке збільшення прогинів, які стабілізувались до 7...10 циклу. Балка працювала пружно. Зсуви накладних плит при тій же інтенсивності практично не виникали.

4. Дослідні епюри деформацій зсуву в дискретних зв'язках накладної плити і основної балки вздовж прольоту не відповідають епюрі поперечних сил, що свідчить про необхідність розробки нової методики розрахунку зсуваючих сил в дискретних зв'язках на довжині півпрольоту складеної балки.

1. Кваша В.Г. Уширение и усиление железобетонных мостов сборно-монолитной ребристой накладной плитой / В.Г.Кваша, В.А.Бояренко // Автотодорожник України.– К., 1991.– №2.– С. 31-35. 2. Кваша В.Г. Досвід ремонту та реконструкції мостів України / В.Г.Кваша // Вісник Теорія і практика будівництва.– Львів: НУ "Львівська політехніка", 2006.– №562.– С. 38-49. 3. Коваль П.М. Експериментальне дослідження роботи балок, об'єднаних з ребристою накладною плитою / П.М.Коваль, С.М.Стечишин // Вісник Резерви прогресу в архітектурі та будівництві.– Львів: ЛПІ, Світ, 1991.– №252.– С. 54-56. 4. Коваль П.М. Дослідження напружено-деформованого стану балок складеного перерізу / П.М.Коваль, С.М.Стечишин, Т.П.Ковальчик // Вісник Резерви прогресу в архітектурі та будівництві.– Львів: ЛПІ, Світ, 1992.– №262.– С. 36-37.