

MINISTERSTWO OŚWIATY I NAUKI UKRAINY
NARODOWY UNIWERSYTET LOTNICZY

Zapotochnyi Roman, syn Mykoły

UDK 624.21

**ODKSZTAŁCALNOŚĆ I ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE DWUBELKOWYCH
CIĄGLYCH ZBIORCZO MONOLITYCZNYCH KONSTRUKCJI
PRZESŁOWYCH MOSTÓW W SKOMPLIKOWANYCH WARUNKACH
BUDOWNICTWA**

05.23.01 – Konstrukcje budowlane, budynki i budowle

Autoreferat
Rozprawy doktorskiej złożonej w celu uzyskania stopnia naukowego
doktora nauk technicznych

Kijów – 2016

Doktorat jest rękopisem.

Praca została wykonana w Uniwersytecie Narodowym „Politechnika Lwowska” Ministerstwa Oświaty i Nauki Ukrainy.

Promotor: doktor habilitowany nauk technicznych,
profesor **Hnideć Bohdan Hryhorowycz**
Uniwersytet Narodowy
„Politechnika Lwowska”
profesor katedry mostów
i mechaniki budowli

Oficjalni recenzenci: doktor habilitowany nauk technicznych,
profesor **Łantuch-Laszczenko Abert
Iwanowycz**
Narodowy Uniwersytet Transportu
profesor katedry mostów i tuneli

doktor nauk technicznych, profesor
Kowal Petro Mykołajowycz
Narodowa Akademia Sztuki i Architektury
kierownik katedry konstrukcji
architektonicznych

Obrona odbędzie się w dniu 11 marca 2016 roku o godzinie 14:00 przed specjalistyczną radą naukową **K 26.062.12** w Narodowym Uniwersytecie Lotniczym za adresem: 03058, Ukraina, Kijów, Aleja Kosmonawta Komarowa 1, blok 5, aud. 303.

Z rozprawą można zapoznać się w Bibliotece Naukowo-Technicznej Narodowego Uniwersytetu Lotniczego za adresem: 03058, Ukraina, Kijów, просп. Kosmonawta Komarowa 1.

Autoreferat wysłano dnia 9 lutego 2016 roku.

Sekretarz naukowy
specjalistycznej rady naukowej K 26.062.12
doktor habilitowany nauk technicznych,
starszy pracownik naukowy, docent:

D. E. Prusow

CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA PRACY

Aktualność tematu. Przy rozwiązywaniu problemów transportu drogowego i miejskiego, biorąc pod uwagę stały wzrost intensywności ruchu, szczególnie w strefach podmiejskich i strefach gęstej zabudowy miejskiej, pojawia się konieczność przyspieszenia tempa budowy wiaduktów, mostów, estakad i wielopoziomowych rozwiązań transportowych w złożonych warunkach budownictwa. Wymaga to rozwiązania specyficznych zadań technologicznych i zastosowania nietypowych rozwiązań projektowych i konstrukcyjnych, co aktualizuje zagadnienie zbadania nowych rozwiązań konstrukcyjnych elementów przeszłowych mostów w skomplikowanych warunkach budowy.

Prace badawcze nad przeszłowymi konstrukcjami mostów w skomplikowanych warunkach budownictwa z wykorzystaniem zbiorczo monolitycznego żelbetonu wywołują zainteresowanie naukowe i celowość praktyczną. Biorąc pod uwagę to, że na obecnym etapie projektowania badania związane z oceną odkształcalności i odporności na pękanie przęseł żelbetowych konstrukcji mostowych o złożonej konfiguracji są niewystarczające, aktualnym staje się problem analizy stanu naprężenia i odkształceń, a także zwiększenie dokładności obliczeń z wykorzystaniem współczesnych metod komputerowych.

Związek pracy z programami naukowymi, planami i tematami. Praca została wykonana w ramach prac naukowo-badawczych, prowadzonych na katedrze „Mosty i mechanika budowli” Instytutu Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Uniwersytecie Narodowym „Politechnika Lwowska” w ramach programu:

- „Opracowanie i ulepszenie metod obliczenia konstrukcji mostów, budynków i budowli” (państwowy numer rejestracyjny 0114U005249).

Na zamówienie Lwowskiej Filii Przedsiębiorstwa Państwowego ZACHIDDIPROSLACH” „UKRDIPRODOR”:

budowa stadionu przy ul. Droga Stryjska-Kilcewa we Lwowie,
budowa węzła drogowego (umowa Nr 66/1 z dnia 05.05.2015 roku).

Cel i zagadnienia badań. Celem badań jest:

-określenie odkształcalności i odporności na pękanie ciągłych dwubelkowych zbiorczo monolitycznych żelbetowych konstrukcji przeszłowych mostów w złożonych warunkach budownictwa a także opracowanie rekomendacji co do ich obliczeń. W tym celu sformułowano następujące zagadnienia:

- zaprojektować dwubelkową ciągłą konstrukcję przeszłowej w skomplikowanych warunkach budownictwa;

- opracować program i metodykę badań eksperymentalnych badawczej konstrukcji przeszłowej złożonej z krzywoliniowej i prostoliniowej częścią;

-przeprowadzić ich wypróbowanie;

- na podstawie danych eksperymentalnych określić wpływ połączenia krzywoliniowej i prostoliniowej części konstrukcji badawczej na zmianę ich odkształcalności i odporności na pękanie, a także wielkości momentów zginających w skrajnych przęsłach;

- Na podstawie danych badań eksperymentalnych i wyników obliczeń zgodnie z obowiązującymi normami dokonać analizę porównawczej odkształcalności i odporności na pękanie części konstrukcji badawczej przed i po ich połączeniu

- opracować przestrzenne modeli obliczeniowe konstrukcji eksperymentalnej i ustalenie charakteru podziału ich odkształcalności na podstawie różnych schematów statycznych i schematów obciążenia w PC „LIRA-SAPR”. Porównać wyniki obliczeń z danymi eksperymentalnymi;

- opracować metodykę przybliżonego określenia momenty zginającego i ugięcia dwubelkowych krzywoliniowych ciągłych przęsłowych konstrukcji mostowych. Porównać wyniki obliczeń przybliżonych z danymi eksperymentalnymi.

Obiekt badania: praca nowej ciągłej dwubelkowej zbiorczo monolitycznej żelbetowej przęsłowej konstrukcji mostu w skomplikowanych warunkach budownictwa pod działaniem obciążenia statycznego.

Przedmiot badań: odkształcalność i odporność na pękanie eksperymentalnej dwubelkowej ciągłej zbiorczo monolitycznej żelbetowej konstrukcji przęsłowej.

Metody badań: analiza źródeł literaturowych niezbędnych dla sformułowania celu i okresu badań; analiza koncepcji mechaniki ciała stałego, teorii żelbetonu i mechaniki pękania; eksperymentalne metody badań konstrukcji budowlanych; modelowanie i badania numeryczne z wykorzystaniem programu PC „LIRA SAPR”; matematyczne i statystyczne metody określenia charakterystyk porównawczych dla opracowania wyników badań eksperymentalnych, danych statystycznych, modelowania numerycznego, a także ustalenie zgodności yników badań eksperymentalnych i numerycznych.

Oryginalne rezultaty naukowe :

- po raz pierwszy zaproponowano nowe konstruktywne rozwiązanie dwubelkowych ciągłych żelbetowych przęsł konstrukcji mostowych w skomplikowanych warunkach budownictwa.

- opracowano metodykę i urządzenia dla wykonania eksperymentalnych badań zaproponowanego konstruktywnego rozwiązania przęsłowej konstrukcji mostowej w warunkach laboratoryjnych.

- uzyskano nowe eksperymentalne dane dotyczące odkształcalności i odporności na pękanie konstrukcji badawczej.

- ustalono, że wielkości odkształcalności i odporności na pękanie badanej konstrukcji uzyskane w sposób eksperymentalny i numeryczny mniej więcej zgadzają

się. Maksymalne odchylenie względne wynosi około 9%.

- rozwinięto i ulepszono metodykę obliczenia przybliżonego odkształcalności i odporności na pękanie dwubelkowych płaskich ciągłych żelbetowych konstrukcji przęseł mostowych o złożonej konfiguracji.

Uzasadnienie naukowych tez, rezultatów i rekomendacji oraz ich wiarygodność potwierdzają się wysoką zgodnością eksperymentalnych i numerycznych wyników uzyskanych na podstawie opracowanej metodyki, podstawą której posłużyły obowiązujące normy projektowania i budownictwa.

Wysoka wiarygodność uzyskanych wyników została potwierdzona:

Prawidłowością i uzasadnieniem wyjściowych założeń;

- Konkretnością sformułowania okresu badań i wykorzystaniem dokładnych metod mechaniki ciała stałego oraz mechaniki pękania;

- zadowalającą zgodnością uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i numerycznych.

Cenność naukowa i praktyczna uzyskanych wyników polega na:

opracowaniu i badaniu nowych konstrukcji mostowych w skomplikowanych warunkach budownictwa,

opracowaniu metodyki wykonania skomplikowanych badań eksperymentalnych odkształcalności i odporności na pękanie elementów konstrukcji,

badaniach numerycznych z wykorzystaniem nowoczesnych metod komputerowych,

opracowaniu przybliżonej metodyki rozwiązań konstrukcji.

Wdrażanie rezultatów pracy. Na zamówienie Lwowskiej Filii Przedsiębiorstwa Państwowego „ZACHIDDIPROSZLACH” „UKRDIPRODOR” (Nr 66/1 z dnia 05.05.2015 roku) autor opracował propozycje projektu wiaduktu z wykorzystaniem zaproponowanych w rozprawie doktorskiej dwubelkowych ciągłych żelbetowych przęseł konstrukcji mostowej na obiekcie: „Budowa stadionu przy ul. Droga Stryjska-Kilcewa we Lwowie: budowa układu drogowego”. Wyniki badań zostały również wprowadzone do procesu naukowego na katedrze „Mosty i Mechanika budowli” w Uniwersytecie Narodowym „Politechnika Lwowska”.

Osobisty wkład doktoranta. Załączone w pracy wyniki badań zostały uzyskane przez autora samodzielnie. Osobisty wkład autora polega na:

- przeprowadzeniu badań eksperymentalnych;

- opracowaniu wszystkich metodyk, ich analizie porównawczej, wykonaniu modelowania i badań numerycznych, co opisano w rozprawie doktorskiej;

- systematyzacji i analizie naukowej uzyskanych wyników;

- opracowaniu dwubelkowej ciągłej zbiorczo monolitycznej konstrukcji przęsłowej mostu w skomplikowanych warunkach budownictwa.

Aprobacja rezultatów rozprawy. Podstawowe założenia przyjęte w rozprawie doktorskiej przedstawiano i wygłoszono podczas następujących konferencji: VII Ogólnieukraińska Konferencja Naukowo-Techniczna „Współczesne problemy naukowo-techniczne powiązane z żelbetem” (Kijów – Równe – 2013 rok), Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Współczesne technologie budownictwa i eksploatacji dróg samochodowych” (Charków – 2013 rok), Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Praktyczna „Współczesne problemy w budownictwie” (Połtawa – 2013 rok), VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Resórsooszczędne materiały, konstrukcje budynków i budowle” (Równe – 2014 rok), Międzynarodowa Naukowo-Praktyczna Konferencja „Nauka dziś. Propozycje” (Szczecin – 2014 rok, Polska).

Publikacje. Na podstawie materiałów rozprawy doktorskiej opublikowano 8 artykułów, w tym 5 publikacji w specjalizowanych wydaniach fachowych, znajdujących się na liście Państwowej Akademii Nauk Ukrainy, w fachowym czasopiśmie zagranicznym i w dwóch książkach materiałów międzynarodowych konferencji naukowo-technicznych.

Zakres i struktura pracy. Rozprawy doktorska zawiera wstęp, 4 rozdziały, wnioski ogólne, spis wykorzystanych źródeł (119 pozycji) i 3 załączniki. Praca mieści się na 222 stronach, w tym 148 stron tekstu podstawowego, 9 stron – spis wykorzystanych źródeł, 63 tablicy, 241 rysunków i 34 stron załączników.

PODSTAWOWA TREŚĆ PRACY

We wstępie uzasadniono aktualność tematu, przytoczono jego ogólną charakterystykę, sformułowano cel i zadania badań, określono nowatorstwo naukowe i wartość praktyczną.

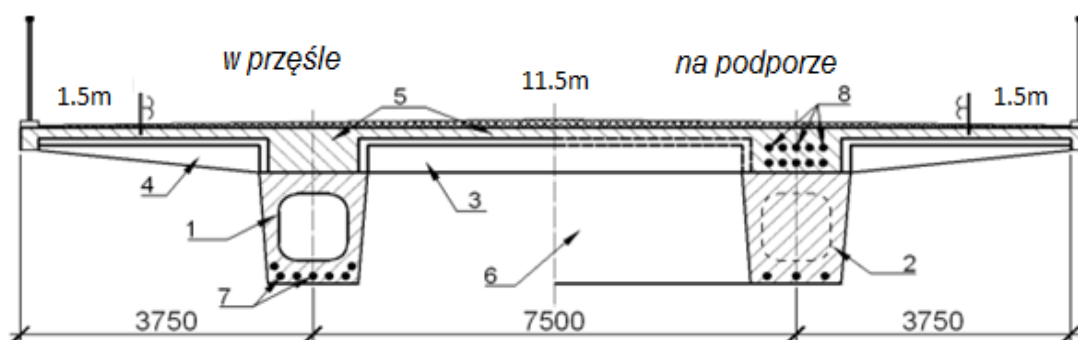
W rozdziale pierwszym opisano i przeanalizowano rozwiązania konstrukcyjne zbiorczo monolitycznych żelbetowych konstrukcji przęsłowych mostów dla nowego budownictwa i przebudowy istniejących konstrukcji transportowych, opracowane i zbadane w Uniwersytecie Narodowym „Politechnice Lwowskiej” na katedrach konstrukcji budowlanych i mostów oraz mechaniki budowli. Konstrukcje takie były badane przez naukowców: B. Gnidec, B. Demczyna, I. Iwanyk, W. Kwasza, F. Klymenko, P. Kowal, A. Kurylo, B. Onyskiw, B. Popowycz, I. Melnyk, W. Salo, J. Sobko, a także naukowców z innych instytucji naukowych Ukrainy: A. Lantuch-Liaszczenko, A. Belyatinsky, Ja. Liwszyc, A. Mazurak, W. Nazarenko, W. Snitko, I. Shapoval, A. Szkuratowsky, E. Edelman, P. Kovalev, Je. Sztilman, M. Lukin, B. Nazarenko, M. Gibszman, P. Zolotov, O. Zeitlin, N. Bogdanov, M. Gibszman, Ju. Yegorushkin, E. Kramer, B. Ulytsky i innych.

Pracy T. Azizova, M. Barabasz, Je. Bakulina, A. Barashikova, W. Bondarenko, O.

Golodnova, O. Gorodetskego, M. Karpenka, W. Permyakova, W. Pershakova, A. Shimanowskego i innych uczonych poświęcone teorii i tworzeniu praktycznemu konstrukcji budowlanych, ich modelowaniu, rozwiązaniu i projektowaniu, badaniom ich właściwości mechanicznych i nośności granicznej oraz tworzeniu modeli obliczeniowych.

Omówiono również znane rozwiązania konstrukcyjne dwubelkowych konstrukcji przęsłowych mostów ze zbiórczego, monolitycznego i zbiórczo monolitycznego żelbetonu, które były badane i wcześniej wykorzystywane w normalnych warunkach budownictwa na Ukrainie i za granicą. Opisano złożone warunki budownictwa, które mogą powstać przy projektowaniu i budowie mostów, szczególnie w miejscowościach z gęstą zabudową.

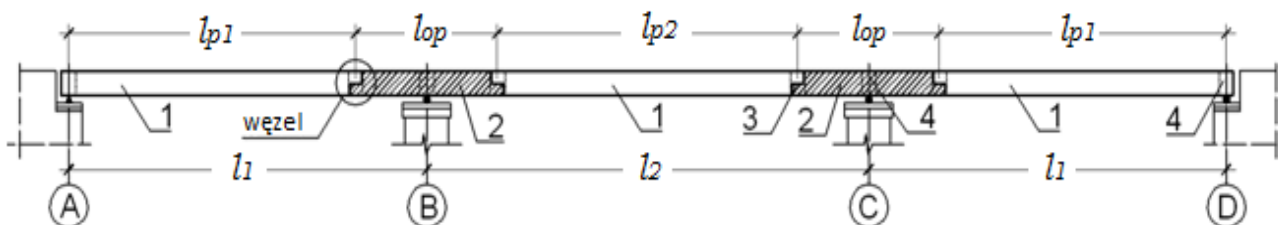
Na rys. 1 i 2 przedstawiono zaproponowane rozwiązanie przęsłowej konstrukcji mostowej w skomplikowanych warunkach budownictwa w postaci dwubelkowej ciągłej zbiórczo monolitycznej konstrukcji żelbetowej.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny zaproponowanej żelbetowej konstrukcji przęsłowej mostu

W przekroju poprzecznym konstrukcja przęsłowa wykonana jest ze zbiórczych belek przęsłowych 1, zbiórczych albo monolitycznych belek nadpodporowych 2, zbiórczych płyt najezdni przęsłowej 3 i wspornikowej 4, oraz betonu scalającego płyty części najezdni i belki 5 (rys. 1).

Na swej długości belki główne podzielone są na zbiórcze przęsłowe 1, nadpodporowe monolityczne albo zbiórcze 2, połączone ze sobą połączeniami, rozmieszczonymi w strefach momentów zerowych (rys. 2).



Rys. 2 Podział belek ciągłych na elementy w zaproponowanej konstrukcji na jej długości: 1-zbiórcza belka przęsłowa, 2- zbiórcza albo monolityczna belka nadpodporowa, 3-belka poprzeczna w strefie łączenia, 4-belka poprzeczna nad podporą

Monolityczne belki nadpodporowe wykonane są jako krzywoliniowe albo załamane, co daje możliwość budowy mostów o małych promieniach skrętów w rzucie.

Połączenia belek przęsłowych i głównych nadpodporowych mogą być wykonane jako wstępnie sprężone ze zbrojeniem metalowym o dużej wytrzymałości albo z wykorzystaniem współczesnego niemetalowego zbrojenia pasmowego o dużej wytrzymałości (CFR itd.).

Podłużne zbrojenie nośne 7 wykonano ze wstępnym napięciem belek zbiorczych w warunkach fabrycznych, a nad podporami – na placu budowy z naciągniętym zbrojeniem 8 na podpory do zabetonowania (rys. 1), co z kolei lepiej zapewnia niezawodność przyczepności zbrojenia do betonu w porównaniu z konstrukcjami monolitycznymi i zbiorczo monolitycznymi, gdzie wstępne napięcie zbrojenia wykonywane z naciągnięciem na beton w kanałach zamkniętych, szczególnie na odcinkach krzywoliniowych.

Cechą charakterystyczną opracowanej dwubelkowej konstrukcji ciągłej jest: zastosowanie zewnętrznego stalowego zbrojenia tarczowego na podporach dolnej części belek głównych w celu wzmocnienia strefy ściskanej;

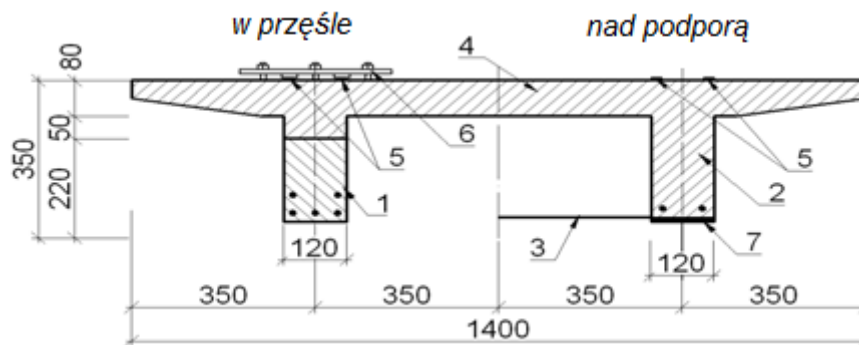
zastosowanie niemetalowego zbrojenia pasmowego o dużej wytrzymałości nad podporami i w strefie połączeń zbiorczych i monolitycznych belek głównych na górnej powierzchni płyty.

W kierunku poprzecznym belki główne połączone między sobą zbiorczymi płytami uźbrowanymi 3, monolityczną częścią płyty 5 i betonem między żebrami płyt zbiorczych (rys. 1) oraz belkami poprzecznymi 6 nad podporami i w strefach połączeń (rys. 2).

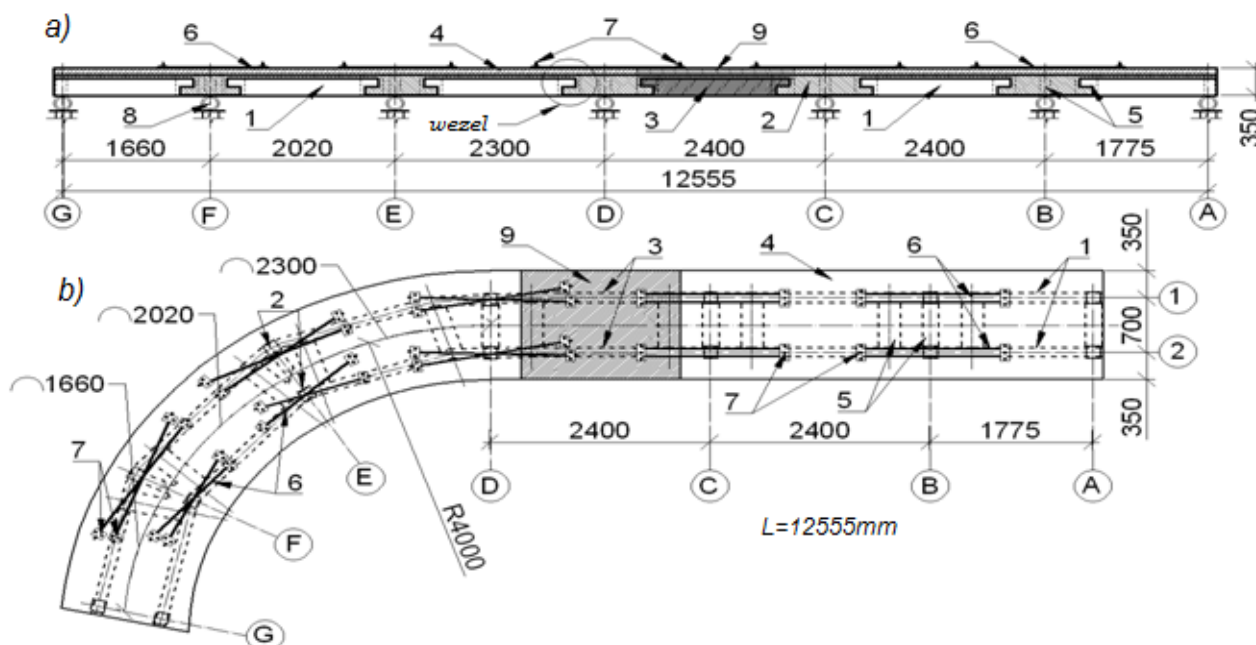
W celu bardziej efektywnego włączenia do pracy wszystkich elementów na szerokości konstrukcji przęsłowej można stosować zbrojenie wstępnie sprężone, umieszczone w belkach poprzecznych i między żebrami podłużnymi płyt zbiorczych z ich następnym zabetonowaniem.

Połączenie zalet żelbetonu zbiorczego i monolitycznego w zaproponowanej dwubelkowej konstrukcji przęsłowej pozwala na bardziej efektywne zastosowanie wieloprzęsłowych konstrukcji ciągłych w skomplikowanych warunkach budownictwa. W pracy dołączono przykłady zastosowania takich konstrukcji w wielopoziomowych rozwiązaniach transportowych.

W rozdziale drugim opisano opracowaną konstrukcję badawczą jako analog dwubelkowej ciągłej zbiorczo monolitycznej żelbetowej konstrukcji mostu przęsłowego z częściami prostoliniową i krzywoliniową. Uwzględniono skomplikowane warunki budownictwa konstrukcji. Opisano także stanowisko badawcze (rys. 3, 4).



Rys. 3. Przekroje poprzeczne konstrukcji badawczej: 1-zbiorcza belka przęsłowa, 2-monolityczna belka nadpodporowa, 3-monolityczna belka poprzeczna, 4- płyta monolityczna , 5-nadpodporowe niemetalowe zbrojenie pasmowe Sika Carbodur S212, 6-kotwa dla zamocowania nad podporowego zbrojenia pasmowego, 7-zewnętrzne zbrojenie tarczowe strefy ściskania na podporach



Rys. 4. Konstrukcja badawcza dwubelkowej ciągłej zbiorczo monolitycznej konstrukcji przęsłowej mostu: 1-zbiorcze belki przęsłowe, 2-nadpodporowe prostoliniowe krzywoliniowe belki monolityczne, 3- belka zbiorcza łącząca prostoliniową i krzywoliniową część konstrukcji, 4-monolityczna część belek i płyt, 5-belki poprzeczne, 6-nadpodporowe niemetalowe zbrojenie pasmowe, 7-kotwy zbrojenia pasmowego, 8-podpora stanowiska z dynamometrem pierścieniowym, 9- płyta monolityczna łącząca krzywoliniową i prostoliniową część konstrukcji

Konstrukcja badawcza została wykonana z dwuprzęsłowej prostoliniowej i trójprzędłowej krzywoliniowej części ciągłych. Na wsporniki zostały oparte belki zbiorcze, łączące ich w konstrukcję sześcioprzęsłową. Dokonano oddzielne wypróbowania dwóch ciągłych części konstrukcji badawczej. Potem zostały one połączone w ciągły układ sześcioprzęsłowy i dokonano ich badanie przy tych samych schematów obciążenia statycznego (Rys. 4).

Dokładnie opisano elementy rozwiązania konstruktywnego konstrukcji

badawczej. Część krzywoliniową tej konstrukcji pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Część krzywoliniowa konstrukcji badawczej na stanowisku eksperymentalnych

W badaniu odkształcalności i odporności na pękanie zaprojektowanych rozwiązań konstruktywnych konstrukcji przeszłowej przeprowadzono trzyetapowe wypróbowania konstrukcji badawczej:

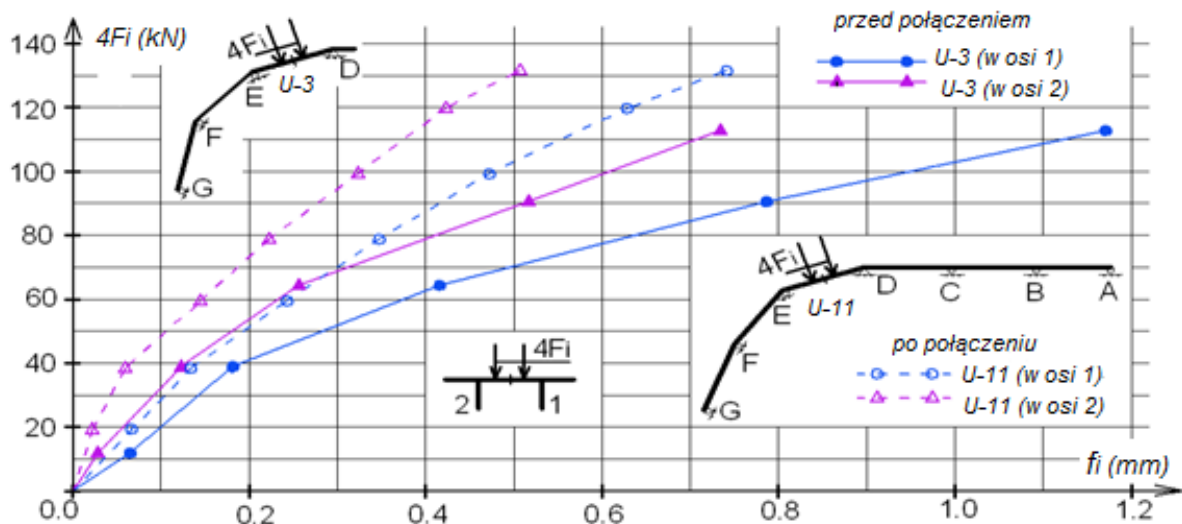
Etap 1. Wypróbowanie części prostoliniowej konstrukcji badawczej dla dwóch schematów obciążeń: w przęśle B-C oraz jednocześnie w przęsłach A-B i B-C.

Etap 2. Wypróbowanie części krzywoliniowej konstrukcji badawczej dla dwóch schematach obciążeń: w przęśle D-E oraz jednocześnie w przęsłach D-E i E-F.

Etap 3. Wypróbowanie konstrukcji badawczej złożonej z części prostoliniowej i krzywoliniowej (rys. 4) w układ ciągły sześcioprzędłowy dla pięciu schematów obciążeń: w przęśle B-C, w przęsłach A-B i B-C jednocześnie, w przęśle E-F, w przęśle D-E, w przęsłach D-E i E-F jednocześnie.

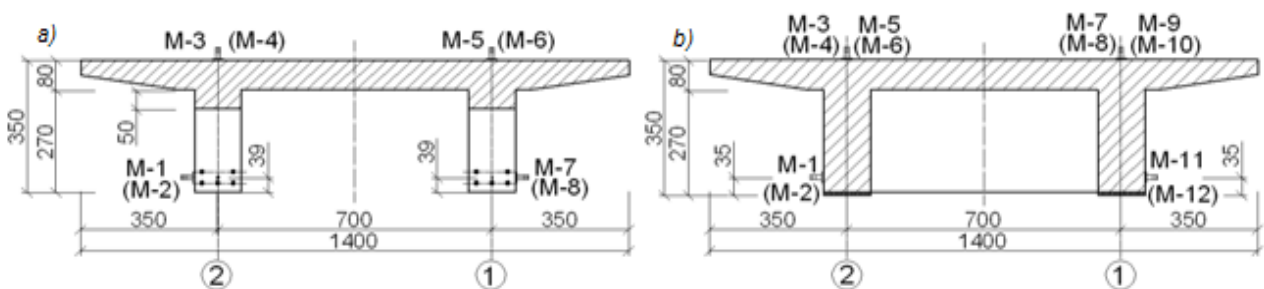
W rozdziale trzecim przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych odkształcalności i odporności na pękanie części konstrukcji badawczej przed i po połączeniu w sześcioprzędłowy układ ciągły oraz przeprowadzono ich analizę.

Ugięcia belek głównych podczas wypróbowania części krzywoliniowej konstrukcji badawczej przy schemacie obciążenia przęsła D-E przed i po połączeniu z częścią prostoliniową przedstawiono graficznie na rys. 6.



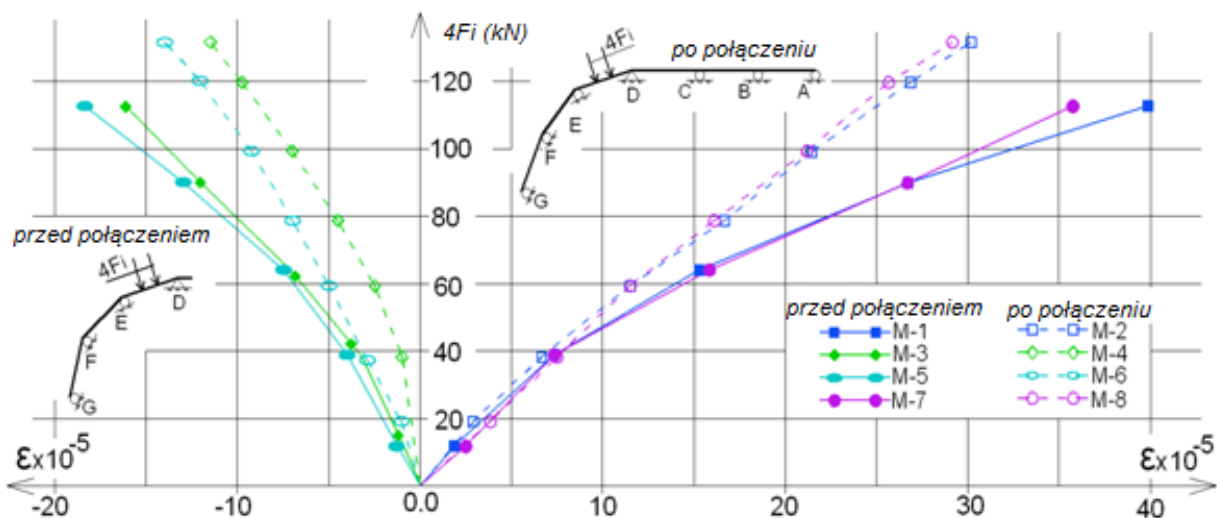
Rys. 6. Ugięcia belek głównych części krzywoliniowej konstrukcji badawczej przy obciążeniu przęsła D-E dla różnych schematów statycznych

Schematy rozmieszczenia narzędzia do określenia odkształceń względnych przekrojów normalnych części krzywoliniowej konstrukcji badawczej w różnych schematach statycznych pokazano na rys. 7.

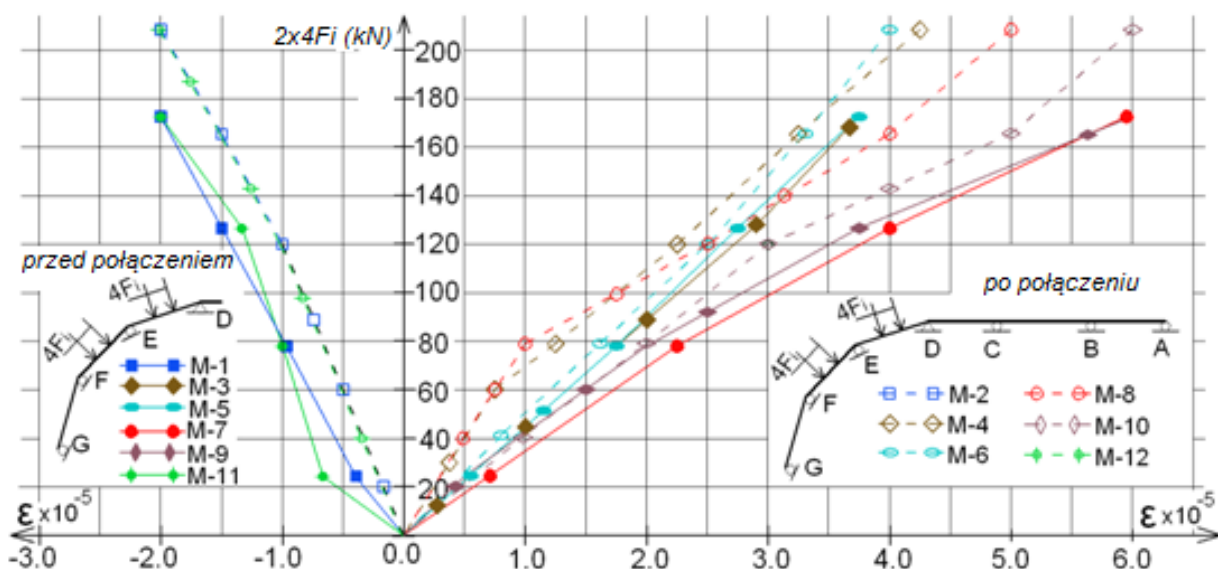


Rys. 7. Schemat rozmieszczenia narzędzia: a) w środku przęsła D-E, b) nad podporą E: M-4, M-6, M-8 i M-10 – posadowione na niemetalowe zbrojenie pasmowe

Na rys. 8 i 9 pokazano zależność odkształceń względnych przekrojów normalnych w środku przęsła D-E i nad podporą E od wielkości przyłożonego obciążenia dla różnych schematów statycznych i schematów obciążenia.



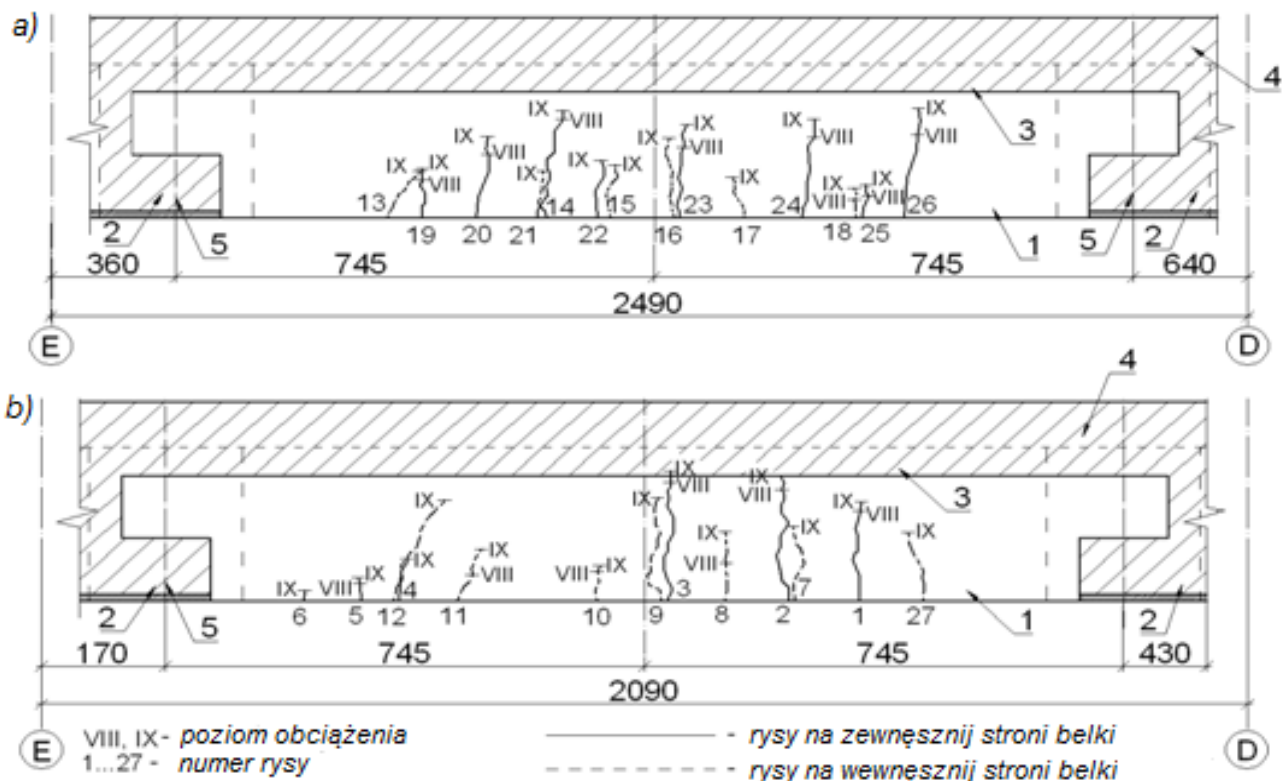
Rys. 8. Odkształcalność przekrojów normalnych w środku przęsła D-E przy obciążeniu konstrukcji badawczej dla różnych schematów statycznych



Rys. 9. Odkształcalność przekrojów normalnych nad podporą E części krzywoliniowej konstrukcji badawczej przy obciążeniu dwóch przęseł

Opisano pracę połączeń zbiorczych i monolitycznych belek głównych przy różnych schematów statycznych i schematów obciążenia konstrukcji badawczej. Badania odrębne części konstrukcji badawczych według schematu obciążenia w przęśle B-C oraz D-E dokonano przed powstaniem widocznych pod mikroskopem pęknięć na powierzchni belek głównych w środku obciążonych przęseł.

Charakter rozpowszechnianie pęknięć w belkach zbiorczych w środku krzywoliniowego przęsła D-E konstrukcji badawczej przedstawiono na rys. 10.



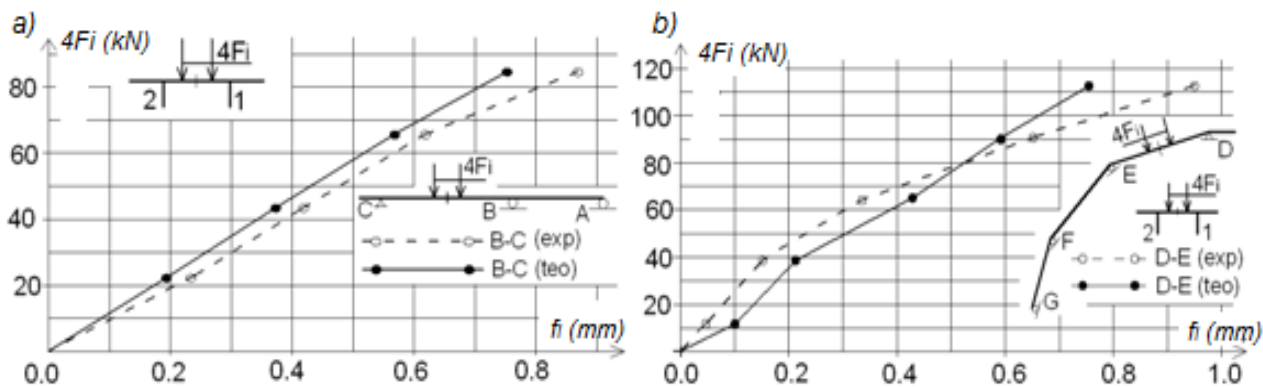
Rys. 10. Charakter rozpowszechnienie pęknięć w przęśle D-E części krzywoliniowej konstrukcji badawczej: a) i b) wzdłuż osi 1 i 2 zewnętrznej i wewnętrznej krawędzi
1-Zbiorcza belka przęsłowa, 2- monolityczna belka nadpodporowa,
3- monolityczna część belki w przęśle, 4- płyta monolityczna, 5- oś połączenia belki zbiorczej i monolitycznej

Ustalono, że wielkości sumaryczne momentów zginających belek wzdłuż osi 1 i 2 konstrukcji badawczej, odpowiadające powstawaniu pęknięć w prostoliniowej ($M_{cr}^{exp}=41.74$ kNxm) i krzywoliniowej ($M_{cr}^{exp}=43.16$ kNxm) częściach zgadzają się z dokładnością do 3%.

W rozdziale czwartym podano wyniki obliczeń, dokonanych przy pomocy wzorów obowiązujących norm (państwowa norma budowlana DBN B.2.3-14:2006), ugięć i odporności na pękanie prostoliniowej i krzywoliniowej części konstrukcji badawczej przed i po ich połączeniu w sześcioprzęsłowy układ ciągły dla różnych schematów obciążenia. Obliczenie statyczne polegało na określeniu momentów zginających na podstawie linii wpływu wzdłuż osi konstrukcji badawczej w przekrojach charakterystycznych: w środku przęseł obciążonych oraz na podporach. Schematy obliczeniowe części konstrukcji badawczej rozpatrzono jako układy prętowe. Reakcje podporowe przyjęto jako sumaryczne od dwóch belek wzdłuż osi konstrukcji.

Wartości eksperymentalne ugięć belek wzdłuż osi 1 i 2 konstrukcji badawczej przyjęto jako średnie i porównano ich z wartościami ugięć uzyskanymi w wyniku obliczeń na podstawie wzorów obowiązujących norm.

Ugięcia numeryczne i eksperymentalne dla niektórych części konstrukcji badawczej przedstawiono na rys. 11.

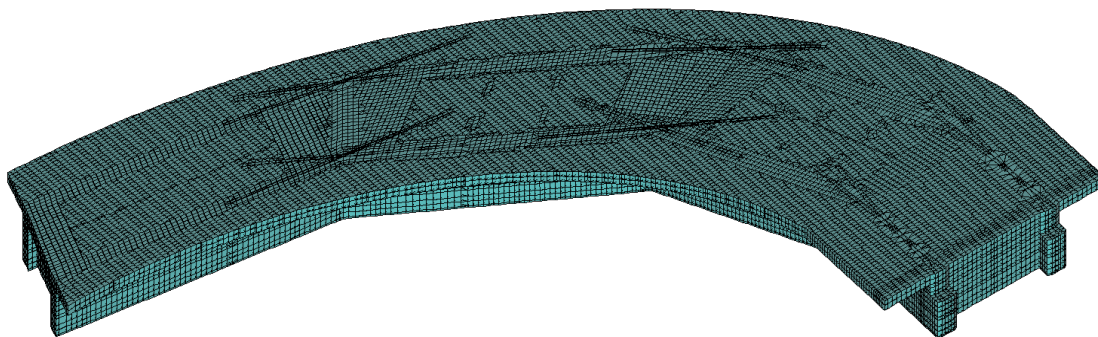


Rys. 11. Ugięcia teoretyczne i eksperymentalne części konstrukcji badawczej:
 a) w środku obciążonego przęsła prostoliniowego B-C
 b) w środku obciążonego przęsła krzywoliniowego D-E

W celu określenia charakteru rozkładu odkształceń części prostoliniowej i krzywoliniowej konstrukcji badawczej przeprowadzono obliczenia numeryczne z wykorzystaniem SYSTEMU PC „LIRA-SAPR”.

Podczas budowy modelu obliczeniowego, uwzględniono różne klasy betonu elementów konstrukcji badawczej, a także zewnętrzne stalowe zbrojenie tarczowe strefy ściskanej dolnych części głównych monolitycznych belek nadpodporowych.

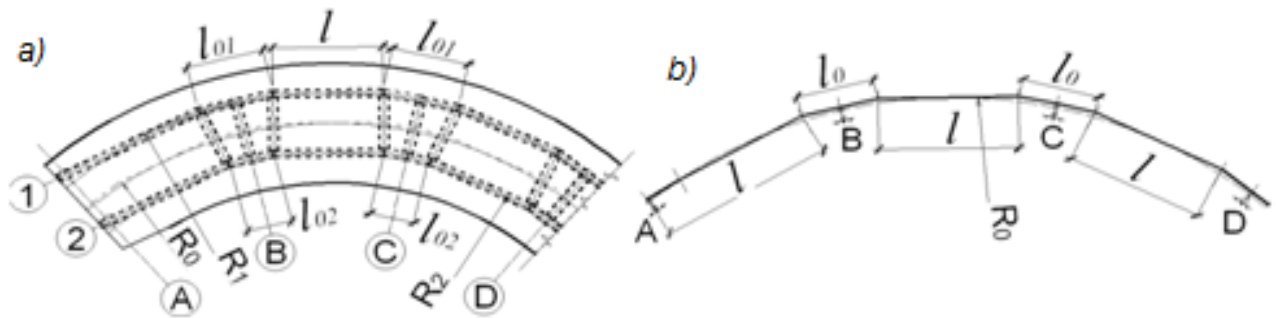
Model części krzywoliniowej konstrukcji badawczej do obliczeń numerycznych za pomocą MES w SYSTEMIE PC „LIRA-CAPR” pokazano na rys. 12.



Rys. 12. Model elementów skończonych części krzywoliniowej konstrukcji badawczej

Przy pomocy obliczeń numerycznych ustalono charakter rozkładu odkształceń modelowej konstrukcji badawczej przed i po połączeniu jego części dla różnych schematów obciążenia statycznego. Ustalono również wpływ zmiany schematu statycznego modelu na zmniejszenie ugięć przęseł skrajnych.

W celu określenia sił wewnętrznych i ugięć dwubelkowych krzywoliniowych ciągłych przęsłowych konstrukcji mostowych oraz ich odporności na pękanie zaproponowano zamienić ich jednobelkową konstrukcją prętową (rys. 13).



Rys. 13. Schematy rozwiązania dwubelkowych krzywoliniowych ciągłych przęsłowych konstrukcji mostowych: a) konstrukcja w rzucie; b) schemat statyczny dla obliczeń: l -długość prostoliniowych belek zbiorczych, l_{01} , l_{02} , l_0 -długości belek nadpodporowych, R_1 , R_2 i R_0 -promienie krzywizn łuku osi

Wartość l_0 określamy jako średnią wartość długości belek nadpodporowych l_{01} i l_{02} na krzywych zewnętrznych i wewnętrznych o promieniach R_1 i R_2 .

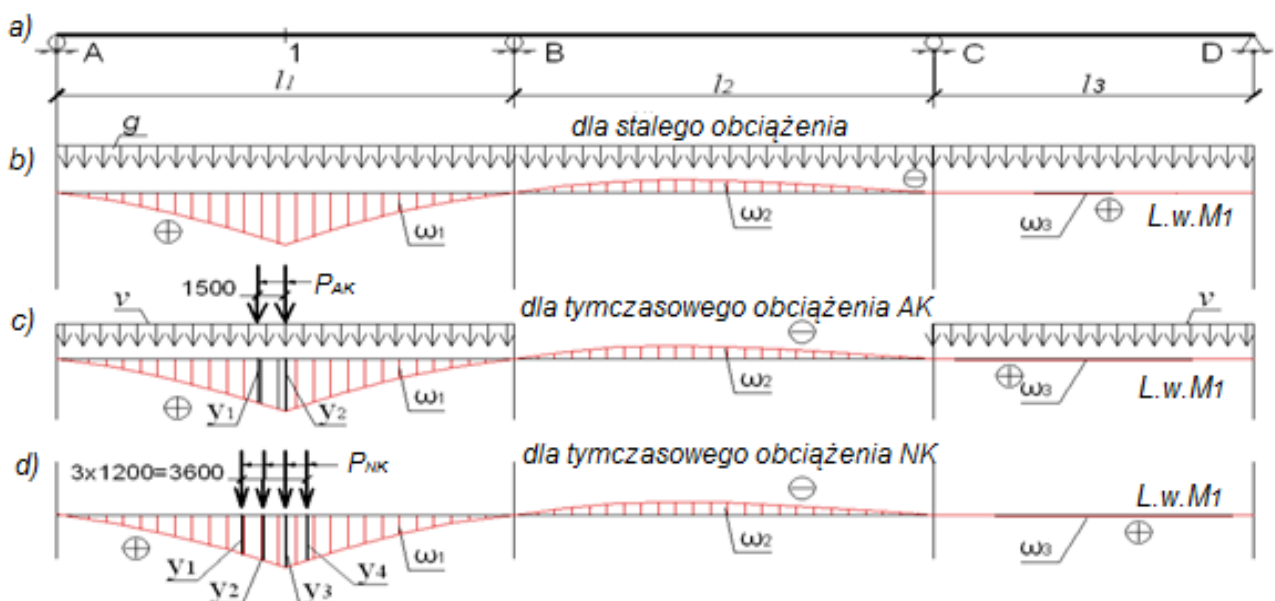
Wartość obliczeniową przęśła między podporami wzdłuż osi przęśła średniego l_c (na przykład B-C) przyjmujemy jako sumę:

$$l_c = l_0 + l \quad (1)$$

Zaleca się obliczenia po etapowe.

Jako przykład rozważmy konstrukcję trójprzęsłową.

I. Najpierw wykonujemy obliczenie statyczne na szerokości całej konstrukcji, rozpatrując ją wzdłuż osi, jako jednobelkowy prostoliniowy układ prętowy (rys. 13). Schematy obciążenia linii wpływu momentu zginającego M_1 w środku skrajnego przęśła l_1 różnymi typami obciążeń pokazano na rys. 14.



Rys. 14. Schematy obciążenia linii wpływu momentu zginającego M_1 w środku skrajnego przęśła l_1 różnymi typami obciążeń.

a) rozwinięcie krzywoliniowej konstrukcji przęsłowej wzdłuż osi;

b), c), d) przyłożenie obciążenia tymczasowego i stałego na linii wpływu M_1

Wartości momentów zginających od obciążeń normatywnych dla konstrukcji jednobelkowej pewnego przekroju i dla konstrukcji całej określone jako wielkości sumaryczne na podstawie obciążenia stałego i tymczasowego:

$$M = M_g + M_{AK}, \quad M = M_g + M_{NK} \quad (2) \quad (3)$$

Normatywne momenty zginające przy obciążeniach stałych (M_g) i tymczasowych AK (M_{AK}) i NK (M_{NK}) określone na podstawie znanych wzorów:

$$M_g = \omega g \quad (4)$$

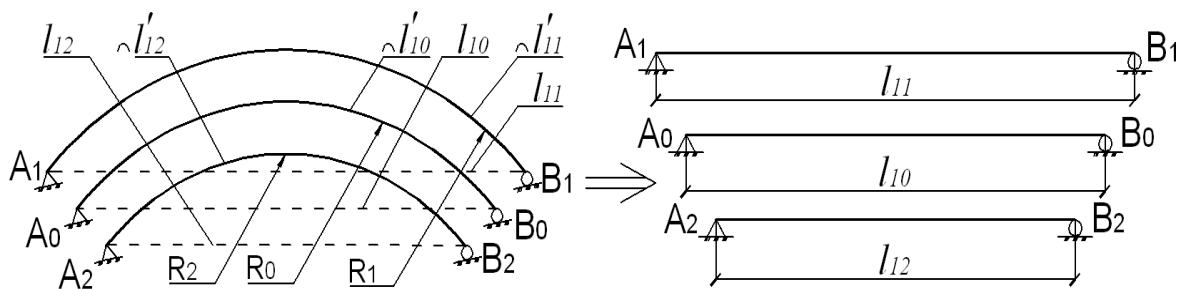
$$M_{AK} = P_{AK}(y_1 + y_2) + v(\omega_1 + \omega_3) \quad (5)$$

$$M_{NK} = P_{NK}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (6)$$

gdzie ω – sumaryczne pole linii wpływu; ω_1 i ω_3 – pole linii wpływu dla obciążenia samochodowego pasmowego v ; y_1, y_2, y_3, y_4 – rzędne linii wpływu dla tymczasowych obciążeń kołowych AK (P_{AK}) i NK (P_{NK}).

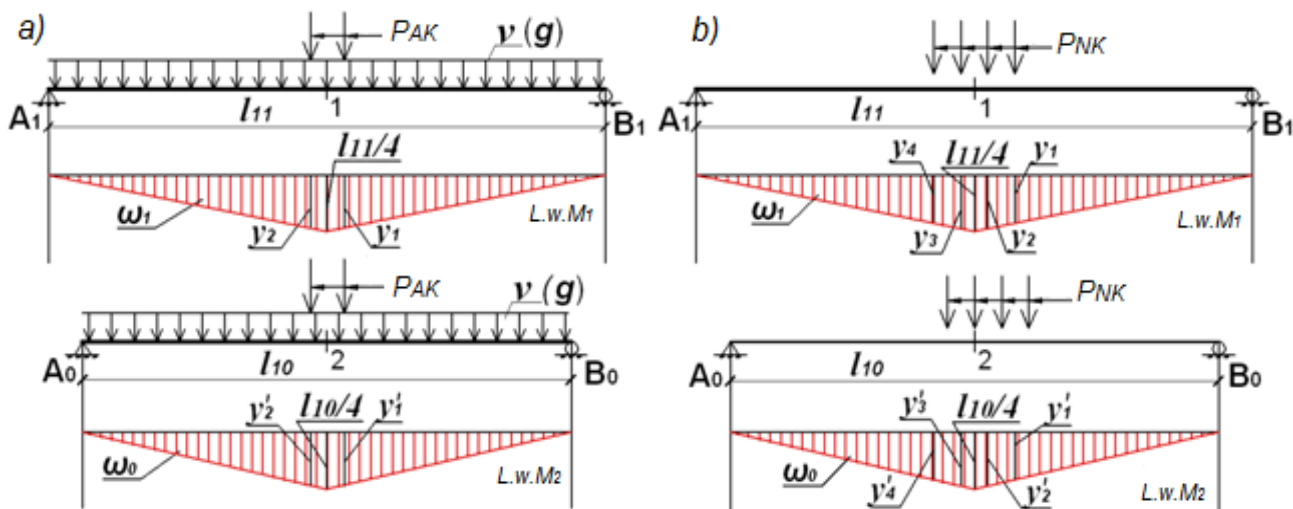
II. Przy określeniu momentów zginających dla belek krzywoliniowych o różnych długościach wzdłuż osi 1 i 2 proponujemy dodatkowo uwzględnić współczynniki rozkładu oddzielnie dla każdego rodzaju obciążenia.

W tym celu należy rozpatrywać konstrukcję w przęśle, w którym przyłożono obciążenie, a mianowicie: wzdłuż osi 1, wzdłuż osi 2 i wzdłuż osi konstrukcji przęsłowej (rys. 15).



Rys. 15. Schematy dla określenia współczynnika rozkładu obciążenia między belkami o różnej długości

W celu uproszczenia obliczeń proponuje się wyznaczać współczynniki rozkładu według linii wpływu, jak dla belek ciągłych prostoliniowych o różnych długościach l_{10}, l_{11}, l_{12} (rys. 16).



Rys. 16. Schematy dla wyznaczania współczynników rozkładu obciążenia na belkach o różnej długości: a) dla obciążenia stałego i tymczasowego AK, b) dla obciążenia tymczasowego NK

Dla belki wzdłuż osi 1 współczynnik rozkładu obciążenia K_{kr} należy określić w sposób następujący (rys. 15 i 16):

- dla obciążenia stałego jako stosunek pól zewnętrznej i środkowej krzywych linii wpływu:

$$K_{kr1}^g = \frac{\omega_1^g}{\omega_0^g} \quad (7)$$

- dla trzech typów obciążenia tymczasowego AK:

- pasmowe jako stosunek pól zewnętrznej i środkowej krzywych linii wpływu:

$$K_{kr1}^v = \frac{\omega_1^v}{\omega_0^v} \quad (8)$$

- stosunek sumarycznych rzędnych na zewnętrznej i środkowej krzywych linii wpływu belek pod skupionymi siłami P_{AK} :

$$K_{kr1}^p = \frac{y_1 + y_2}{y_1' + y_2'} \quad (9)$$

- obciążenie tymczasowe NK jako stosunek sumarycznych rzędnych na zewnętrznej i środkowej krzywych linii wpływu belek pod skupionymi siłami P_{NK} :

$$K_{kr1}^{NK} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{y_1' + y_2' + y_3' + y_4'} \quad (10)$$

gdzie we wzorach (7 ... 10) ω_1, ω_0 – pola krzywych linii wpływu w przęśle obciążonym belki wzdłuż osi 1 i belki zastępczej wzdłuż osi 0; y_i, y_i' – rzędne linii wpływu wzdłuż osi 1 i 0 pod obciążeniem skupionym AK i NK.

III. Dla określenia odporności na pęknięcie zgodnie z państwowymi normami budowlanymi dla 2-ej grupy stanów granicznych opracowano metodykę określenia momentów normatywnych w belkach różnej długości na odcinkach krzywoliniowych dla różnych rodzajów obciążenia. Przy tym najpierw określają się momenty w środku przęsła belki wzdłuż osi 1 z uwzględnieniem współczynnika rozkładu w belkach różnej długości według wzorów:

- pod działaniem obciążenia stałego g i tymczasowego AK:

$$M_1 = M_{g1} + M_{AK} \quad (11)$$

- pod działaniem obciążenia stałego g i tymczasowego NK:

$$M_1 = M_{g1} + M_{NK} \quad (12)$$

- moment zginający od obciążenia stałego:

$$M_{g1} = K_{kr1}^g \frac{g}{2} \omega \quad (13)$$

- moment zginający od normatywnego obciążenia tymczasowego AK:

$$M_{AK}^1 = K_{pr}^p K_{kr1}^p (1 + \mu) P_{AK} (y_1 + y_2) + v K_{pr}^v K_{kr1}^v (\omega_1 + \omega_3) \quad (14)$$

- moment zginający od normatywnego obciążenia tymczasowego NK:

$$M_{NK}^1 = K_{pr}^{NK} K_{kr1}^{NK} P_{NK} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (15)$$

gdzie $K_{kr1}^g, K_{kr1}^p, K_{kr1}^v, K_{kr1}^{NK}$ – dodatkowe współczynniki rozkładu na krzywych odcinkach konstrukcji przęsłowej dla belki wzdłuż osi 1 pod obciążeniem g , AK i NK; $K_{pr1}^p, K_{pr1}^v, K_{pr1}^{NK}$ – współczynniki rozkładu poprzecznego zgodnie z normami dla belki prostoliniowej wzdłuż osi 1 pod obciążeniami AK i NK, $(1+\mu)$ – współczynnik dynamiczny, g – obciążenie stałe, P_{AK}, v – obciążenie osiowe i pasmowe AK, P_{NK} – obciążenie osiowe NK, $\omega, \omega_1, \omega_3, y_1, y_2, y_3, y_4$ – pola linii wpływu i rzędne od obciążenia AK i NK wzdłuż osi konstrukcji krzywoliniowej.

Normatywne momenty zginające M_2 dla belki wzdłuż osi 2 dla różnych rodzajów obciążeń proponuje się wyznaczać jako różnicę między momentami normatywnymi M i M_1 , określonymi według wzorów (2)-(6) i wzorów (11)-(15):

$$M_2 = M - M_1 \quad (16)$$

Żeby określić wartości obliczeniowych momentów zginających zgodnie z

państwowymi normami budowlanymi DBN B.1.2-15:2009 (Konstrukcje transportowe. Mosty i tunele. Obciążenie i wpływy) należy uwzględnić współczynniki niezawodności dla obciążeń stałych i tymczasowych.

IV. Przy rozwiązaniu części krzywoliniowej konstrukcji dwubelkowej zgodnie z grupą 2-ą stanów granicznych zaproponowano metodykę określenia ugięć belek wzdłuż osi 1 i 2.

Dla określenia ugięcia zaproponowano zastosować współczynnik rozkładu ugięć K_{rp} między belkami o różnej długości pod działaniem różnych rodzajów obciążeń, a mianowicie dla belki wzdłuż osi 1 w przęśle pierwszym l_1 (rys.15):

- pod działaniem obciążenia stałego g :

$$K_{rp}^g = \frac{f_1^g}{f_0^g} = \frac{\omega_1^g}{\omega_0^g} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} = K_{kr1}^g \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} \quad (17)$$

- pod działaniem obciążenia tymczasowego AK:

- dla obciążenia pasmowego:

$$K_{rp1}^{kv} = \frac{f_1^g}{f_0^g} = \frac{\omega_1^g}{\omega_0^g} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} = K_{kr1}^{kv} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} \quad (18)$$

- dla tandemu obciążenia AK:

$$K_{rp1}^p = \frac{f_1^p}{f_0^p} = \frac{y_1+y_2}{y_1'+y_2'} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} = K_{kr1}^p \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} \quad (19)$$

- dla obciążenia tymczasowego NK:

$$K_{rp1}^{NK} = \frac{f_1^{NK}}{f_0^{NK}} = \frac{y_1+y_2+y_3+y_4}{y_1'+y_2'+y_3'+y_4'} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} = K_{kr1}^{NK} \frac{l_{11}^2}{l_{10}^2} \quad (20)$$

Współczynniki rozkładu ugięć na odcinku krzywoliniowym zgodnie ze wzorami (17)-(2) wyznaczamy w sposób mnożenia współczynników rozkładu obciążeń, uzyskanych zgodnie ze wzorami (7)-(10) razy stosunek kwadratów wartości ugięć belek wzdłuż osi 1 i osi konstrukcji przęsłowej.

Porównanie wartości ugięć otrzymanych w wyniku wypróbowania części krzywoliniowej konstrukcji badawczej dla różnych schematów obciążenia przed i po połączeniu jej z częścią prostoliniową w sześcioprzęsłowy układ ciągły dla różnych wartości ugięć, określonych na podstawie zaproponowanej metodyki przedstawiono w tabeli 1.

Stosunek ugięć głównych belek konstrukcji badawczej

№	Schemat obciążenia	Stosunek ugięć belek w osi 1 i 2 konstrukcji badawczej		Odchylenia
		Na podstawie eksperymentu f_1^{exp} / f_2^{exp}	Na podstawie obliczeń f_1^{teo} / f_2^{teo}	
1		W środku przęsła D-E (U-3):		
		1.642	1.746	6%
2		W środku przęsła D-E (U-3)		
		1.772	1.746	1.5%
		W środku przęsła E-F (U-6)		
		1.357	1.681	19%
3		W środku przęsła D-E (U-11)		
		2.2	1.746	20%
		W środku przęsła E-F (U-14)		
		1.708	1.681	2%
4		W środku przęsła E-F (U-14)		
		1.413	1.681	15%

Rozbieżność wartości ugięć na podstawie danych eksperymentalnych i na podstawie zaproponowanej przybliżonej metodyki obliczeń dla części krzywoliniowej konstrukcji badawczej przy różnych schematach statycznych i schematach obciążenia znajduje się w granicach 2-20%. Taką rozbieżność rezultatów dla różnych schematów obciążenia można uzasadnić koniecznością uwzględnienia wpływu skręcania.

Obliczenie odporności na pękanie, przeprowadzone zgodnie z państwową normą budowlaną DBN B.2.3-14:2006 w przekrojach części krzywoliniowej konstrukcji dwubelkowej. Dokonano porównanie otrzymanych rezultatów z wynikami badań. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Momenty zginające powstawania pęknięć części konstrukcji badawczej

№	Schemat obciążenia	Moment zginający (kNm)		Odchylenia (%)
		M_{cr}^{exp}	M_{cr}^{teo}	
1		41.74	39.72	4.8%
2		43.16	39.72	7.9

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Zaprojektowano nową dwubelkową ciągłą zbiorczą monolityczną przęsłową konstrukcję mostu w skomplikowanych warunkach budownictwa. Założono możliwość zmiany kształtu konstrukcji w rzucie, rozgałęzień, zakrętów, nietypowych wielkości przęseł i szerokości jezdni. Projekt opracowano dla przęseł od 18,0 do 42,0 m.

2. Zgodnie z celem pracy, opracowano program i metodykę wykonania badań eksperymentalnych. Przeprowadzono badania badawczej dwubelkowej ciągłej zbiorczej monolitycznej konstrukcji przęsłowej mostu z częściami prostoliniową i krzywoliniową. Badania wykonano przed i po połączeniu ich w układ sześcioprzęsłowy dla dziewięciu schematów obciążenia.

3. Ustalono, że po połączeniu eksperymentalnie wyznaczone wartości w środku skrajnych obciążonych przęseł części prostoliniowej i krzywoliniowej konstrukcji badawczej zmniejszyły się istotnie, a mianowicie: momenty zginające o 23% i 27%, odkształcenia względne przekrojów normalnych o 18% i 24%, a ugięcia o 21% i 40%. Taki wyniki należy uwzględnić przy projektowaniu konstrukcji przęsłowych budowli transportowych.

4. Wielkości obliczeniowe momentów i ugięć, określone zgodnie z obowiązującymi normami, dla części prostoliniowej i krzywoliniowej konstrukcji badawczej przed i po ich połączeniu, zadowalająco zgadzają się z danymi eksperymentu, przy tym: momenty zginające 3-9%, pęknięcia 5-8%, ugięcia 4-9%.

5. Ustalono, że połączenie części prostoliniowej i krzywoliniowej konstrukcji badawczej wpływają na charakter rozkładu odkształceń, określonych w pracy metodą elementów skończonych w Systemie PC „LIRA SAPR” i zmniejszają ugięcia w

skrajnych przęsłach w przedziale 30-40%, co zadowalająco zgadza się z danymi eksperymentu.

6. Zaproponowano metodykę przybliżonego rozwiązania konstrukcji dla określenia sił i ugięć. W tej metodyce zastosowano nowe współczynniki dla określenia charakteru ich rozkładu w belkach głównych i w przekroju poprzecznym krzywoliniowych dwubelkowych konstrukcji przęsłowych dla różnych rodzajów obciążenia. Odchylenie otrzymanych rezultatów z danymi eksperymentalnymi w średnim wynosi 8-20%.

SPIS PUBLIKACJI Z TEMATU ROZPRAWY DOKTORSKIE

Artykuły opublikowane w wydaniach fachowych Ukrainy:

1. Hnidec B. H. Dwubelkowe zbiorcze monolityczne ciągłe żelbetowe konstrukcje przęsłowe mostów w skomplikowanych warunkach budownictwa. / B. H. Hnidec, R. M. Zapotochnyi // Konstrukcje budowlane: zbiór prac naukowych – Kijów. DP NDIBK, 2013, Wyd. 78, t. 1, S. 67-75 (wkład doktoranta: opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego dwubelkowych żelbetowych konstrukcji przęsłowych, konstrukcji badawczej i programu badania eksperymentalnego).

2. Zapotochnyi R. M. Odkształcalność konstrukcji badawczej dwubelkowej ciągłej zbiorczej monolitycznej konstrukcji przęsłowej mostu. / R. M. Zapotochnyi // Zbiór prac naukowych. Seria: Branżowa budowa maszyn, budownictwo, Wydanie 4 (39). Tom 2. Połtawa 2013. S. 59-65.

3. Zapotochnyi R. M. Zbiorcze monolityczne dwubelkowe ciągłe konstrukcje przęsłowe mostów żelbetowych z odcinkiem prostym, krzywoliniowym i przechodnim. // R. M. Zapotochnyi // Zbiór prac naukowych. Materiały ekonomiczne, konstrukcje, budynki i budowle. Równe 2013. Wyd. 27. S. 315-320.

4. Zapotochnyi R. M. Odkształcalność badawczej ciągłej dwubelkowej zbiorczej monolitycznej żelbetowej konstrukcji przęsłowej mostu dla skomplikowanych warunków budownictwa przy zmianie jej schematu statycznego. / R. M. Zapotochnyi // Zbiór prac naukowych. Materiały źródłowe, konstrukcje, budynki i budowle. Równe 2013. Wyd. 29. S. 415-419.

5. Iwanyćkyj Ja. Ł. Metoda optyczno-cyfrowa wyznaczania pól odkształceń na odcinkach miejscowych mostów żelbetowych. / Ja. Ł. Iwanyćkyj, O. P. Maksymenko, R. M. Zapotochnyi, Ju. W. Malkow // Mechanika fizyczno-chemiczna materiałów. 2015. Tom 51, Nr 2. S. 104-108 (wkład doktoranta: bezpośredni udział w przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, przetworzeniu i analizie wyników dotyczących wyznaczenia odkształcalności przekrojów normalnych łączy prefabrykowanych i monolitycznych belek głównych konstrukcji badawczej na podstawie demonstracji urządzeń mechanicznych).

Artykuły opublikowane w fachowych czasopismach zagranicznych:

6. B. Hnidec Badania doświadczalne dwubelkowych ciągłych przęseł mostów z betonu/ B. Hnidec, R. Zapotochnyi // Inżynieria i budownictwo» nr 9/2015- S. 484-487. (wkład doktoranta: opracowanie konstrukcji doświadczalnej, bezpośredni udział w przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, przetworzeniu i analizie wyników dotyczących wyznaczenia ugięć belek głównych i odkształcalności przekrojów normalnych w środku przęseł i na podporach).

7. Ivanyts'kyi Ya.L. Optical-digital method for the determination of strain fields in local areas of reinforced-concrete bridges // Ya.L. Ivanyts'kyi, O.P. Maksymenko, R.M. Zapotochnyi, Yu. V. Mol'kov// Material Science, Vol.51, No.2. p. 261-266. (USA-2015) (Translated from Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv, Vol. 51, No. 2, pp. 104–108, March–April, 2015.)

Artykuły opublikowane w materiałach międzynarodowych konferencji naukowo-technicznych:

8. Zapotochnyi R. M. Technologia budowy dwubelkowych ciągłych żelbetowych zbiorczych monolitycznych konstrukcji przęsłowych mostów dla złożonych warunków budownictwa. / R. M. Zapotochnyi // Materiały międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej. Współczesne technologie budownictwa i eksploatacji dróg samochodowych. Charków 2013. S. 109-113.

9. Zapotochnyi R. M. Odkształcalność krzywoliniowej dwubelkowej ciągłej żelbetowej konstrukcji przęsłowej mostu dla skomplikowanych warunków budownictwa przy zmianie jej schematu statycznego. / R. M Zapotochnyi // Zbiór referatów naukowych. Nauka dziś. Propozycje. Szczecin 2014 (Polska). Część 1. S. 11-15.

ADNOTACJA

Zapotochnyi R. M. Odkształcalność i odporność na pękanie dwubelkowych ciągłych zbiorczych monolitycznych konstrukcji przęsłowych mostów w skomplikowanych warunkach budownictwa. - Na prawach rękopisu.

Rozprawa Doktorska złożona w celu uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w specjalności 05.23.01 - „Konstrukcje budowlane, budynki i budowle”. Narodowy Uniwersytet Lotniczy Ministerstwa Oświaty i Nauki Ukrainy, Kijów 2015.

Rozprawa Doktorska poświęcona badaniu odkształcalności i odporności na pękanie zaproponowanych przez autora rozwiązań konstruktywnych dwubelkowych ciągłych zbiorczych monolitycznych żelbetowych konstrukcji przęsłowych mostów w skomplikowanych warunkach budownictwa. Zamieszczono istotne wyniki badań eksperymentalnych badawczej konstrukcji przęsłowej mostu na podstawie zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Konstrukcję wykonano z częściami prostoliniową i krzywoliniową, które poddawano wypróbowaniem dla różnych schematów statycznych i schematów obciążenia. Dokonano porównania danych eksperymentu z wynikami obliczeń według wzorów obowiązujących norm. Przedstawiono charakter rozkładu przestrzennego odkształceń idealizowanej konstrukcji badawczej dla różnych schematów statycznych i schematów obciążenia, otrzymanego w

sposób obliczeń numerycznych w Systemie MSE w PC „LIRA-SARP” .

Przedstawiono także propozycje metodyki przybliżonego określenia momentów gnących i ugięć dwubelkowej żelbetowej konstrukcji przęsłowej mostów na odcinkach krzywoliniowych konstrukcji transportowej. Dokonano porównanie danych eksperymentalnych z wynikami obliczeń, uzyskanych na podstawie zaproponowanej metodyki.

Słowa kluczowe: dwubelkowa konstrukcja przęsłowa, skomplikowane warunki budownictwa, konstrukcja badawcza, odkształcalność, odporność na pękanie.

Roman Zapotoczny