

Doświadczenia z realizacji sprężenia zewnętrznego konstrukcji mostów zespolonych

Podstawy modelowania sprężonych belek zespolonych

W latach 2001–2005 autor artykułu przeprowadził badania laboratoryjne i analizy teoretyczne, których celem było określenie nośności i zachowania się belek zespolonych sprężanych kablami zewnętrznymi [1]. Schemat statyczny stanowiła belka swobodnie podparta obciążana symetrycznie dwiema pionowymi siłami skupionymi. Przygotowano dwa niezależne modele z wykorzystaniem metody *Ritza* i metody elementów skończonych MES, uwzględniające nieliniowości fizyczne materiałów belek, nieliniową charakterystykę zespolenia i rozkład sworzni. Wykazano, że kształt trasy kabli (odgięte i proste przy tym samym mimośrodku) nie ma większego wpływu na nośność i sztywność giętną belki. Przeanalizowano wpływ sprężenia na zarysowanie płyty betonowej, a także zagadnienie lokalnego wzrostu wyężenia połączenia ścinanego pod wpływem przekazywania siły skupionej z kabla zewnętrznego na element stalowy. Wyniki badań przedstawiono w [2, 3]. W przypadku betonowych konstrukcji sprężonych i belek zespolonych wartość siły sprężającej nie ma znaczącego wpływu na nośność graniczną, a ponieważ w projektowaniu mostów w Polsce nie dopuszcza się zazwyczaj uplastycznienia stali konstrukcyjnej, sam zabieg sprężenia jest prosty do zamodelowania. W odmienny sposób przedstawia się aspekt realizacyjny i konstruowania detali.

Podstawowe zasady sprężenia zewnętrznego konstrukcji zespolonych

Istnieją dwa zasadnicze założenia dotyczące sprężenia zewnętrznego belki zespolonej, tj. zmniejszenie naprężeń rozciągających w stalowym pasie dolnym w przęśle belki i ograniczenie zarysowania płyty betonowej nad filarami. W tym celu można stosować proste odcinkowe kable lub kable odgięte z wykorzystaniem dewiatorów. W pierwszym przypadku można zastosować sprężenie belki stalowej, a następnie zabetonowanie płyty lub sprężenie konstrukcji zespolonej. Ten drugi przypadek będzie analizowany w artykule ze względu na jego użyteczność przy wzmacnianiu istniejących mostów zespolonych.

W Polsce sprężenie zewnętrzne konstrukcji zespolonych jest stosowane od dawna. Przykładem jest most w Ściborzu w ciągu drogi krajowej nr 408 Kłodzko–Gliwice [4], w którym zastosowano sprężenie w postaci prostych kabli pod półką dolną dźwigarów w przęsłach przed zabetonowaniem płyty pomostowej i jej zespoleniem z dźwigarami stalowymi (sprężenie belki stalowej). Z kolei w moście przez rzekę Widawę w ciągu ul. Kamieńskiego we Wrocławiu [5] konstrukcję nośną stanowią dźwigary stalowe ażurowe zespolone z płytą pomostu, tzw. bażykówki, wzmocnione przez sprężenie zewnętrzne ze względu na przejazd ponadnormatywny (sprężenie belki stalowej). Ciężna kotwiono w górnej części belek i stosowano dewiatory.

Te dwie realizacje analizowano w ramach [1]. W przypadku sprężenia belki stalowej, przed włączeniem betonowej płyty do współpracy, należy zwrócić uwagę na problem globalnej sta-

teczności tej belki, a w przypadku sprężania konstrukcji nitowanych – unikać zmiany kierunku sił wewnętrznych w istniejącej konstrukcji. W przypadku sprężania belki zespolonej problem utraty stateczności w praktyce zazwyczaj nie występuje, ale jest istotne dodatkowe wyężenie połączenia ścinanego w miejscu zakotwienia kabli, a także zarysowania płyty betonowej. Ważnym zagadnieniem jest też nośność i konstrukcja strefy zakotwienia kabli.

Most drogowy w miejscowości Maluszyn

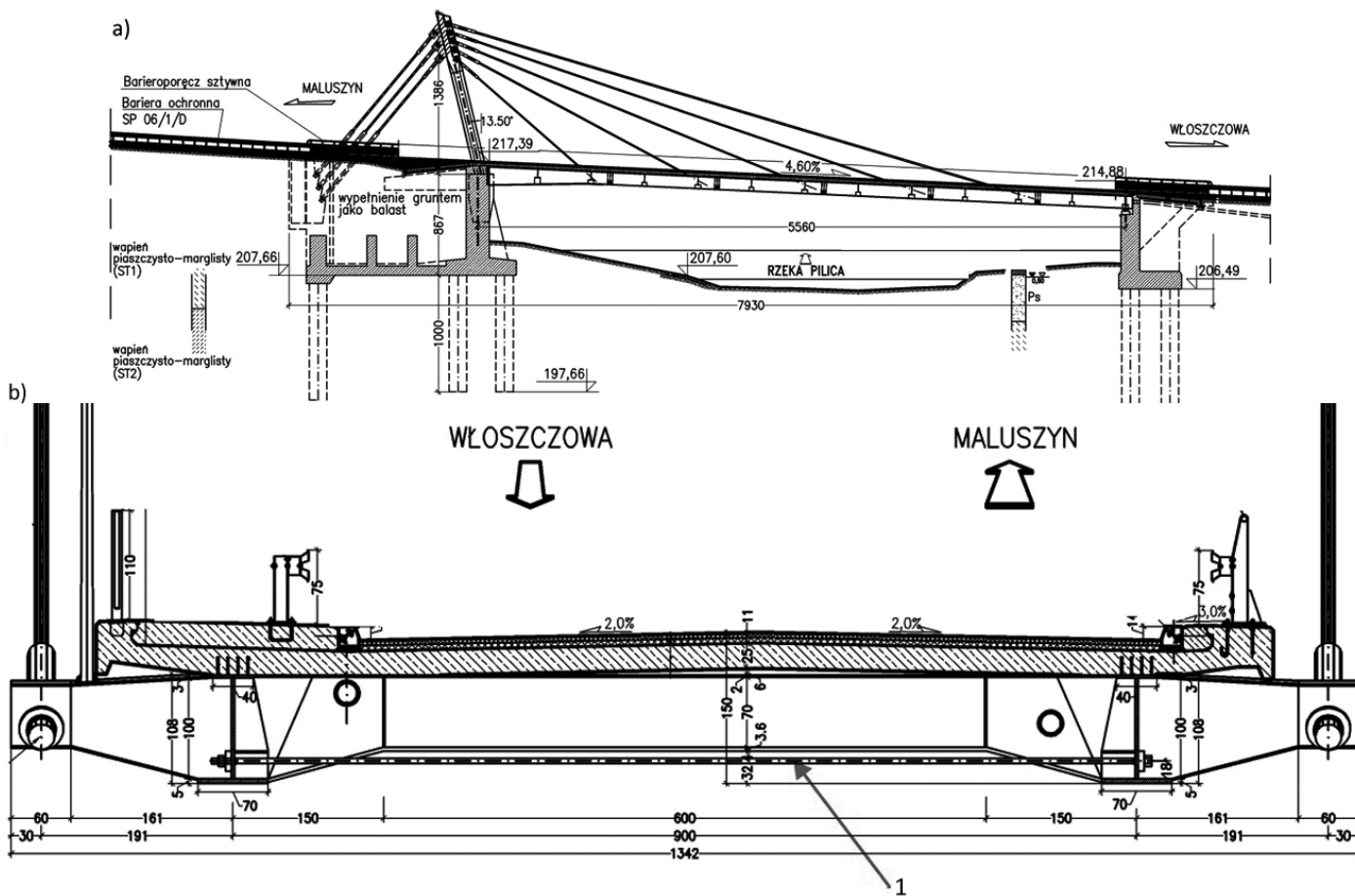
Nowo projektowany (tzn. niewzmacniany) most przez rzekę Pilicę w ciągu drogi wojewódzkiej nr 785 stanowi przykład konstrukcji zespolonej sprężonej zewnątrz (rys. 1). Został zaprojektowany do przeniesienia obciążeń użytkowych klasy A według PN-S-10030:1985 (+ Stanag) i w sytuacji wyjątkowej – obciążenia klasy C bez jednej pary lin podwieszających przy następujących założeniach:

- przeszło o konstrukcji zespolonej będzie podwieszane do stalowego pylonu;
- w konstrukcji stalowej będą stosowane tylko przekroje otwarte;
- nie będzie stosowane sprężenie podłużne płyty pomostu;
- poprzecznice dwuteowe ze wspornikami do zakotwienia lin będą doprężane prętami ze stali wysokiej wytrzymałości;
- przeciwwagę będzie stanowić skrzynia balastowa wypełniona gruntem.

W kontekście opisywanych zespolonych konstrukcji sprężonych zewnątrz podkreśla się dwa istotne rozwiązania konstrukcyjne przyjęte w konstrukcji mostu:

- rezygnację ze sprężenia podłużnego płyty pomostowej w strefie ujemnych momentów zginających w dźwigarze;
- sprężenie poprzeczne w postaci doprężenia poprzecznic prętami o wysokiej wytrzymałości po podwieszeniu konstrukcji; takie rozwiązanie prawdopodobnie zastosowano w Polsce po raz pierwszy w konstrukcji przęsła zespolonego.

Oba rozwiązania prowadzą do lepszego wykorzystania materiału konstrukcji oraz usprawnienia technologii budowy, a także obniżenia kosztów realizacji konstrukcji mostu w Maluszynie. Stosując rozwiązanie drugie, tworzy się układ konstrukcyjny w postaci sprężonej belki zespolonej, a także zmniejsza się zużycie stali w poprzecznicach. Nie ma też konieczności stosowania rozbudowanych poprzecznic o dużej sztywności skrętnej i eliminuje się negatywny wpływ w postaci zginania pasów dolnych dźwigara głównego w płaszczyźnie poziomej, będący efektem skręcania dźwigarów spowodowanego oddziaływaniem wsporników lin podwieszających. Występuje tu więc zagadnienie przekazywania siły z elementu stalowego w strefie zakotwienia kabli na płytę betonową i konieczność stosowania adekwatnej liczby sworzni, tj. podobnie jak w pomostach zespolonych mostów łukowych. Na rysunku 2 przedstawiono m.in. rozbudowaną konstrukcję pasa górnego dźwigara głównego w miejscu połączenia z poprzecznicą w strefie zamocowania lin podwieszających. Sprężenie poprzecznic wykonano za pomocą prętów ze stali wysokiej wytrzymałości.



Rys. 1. Most drogowy przez rzekę Pilicę w miejscowości Maluszyn: a) widok ogólny konstrukcji mostu, b) przekrój poprzeczny; 1 – sprężenie poprzeczne prętami



Rys. 2. Most drogowy przez rzekę Pilicę w miejscowości Maluszyn – widoczne sprężenie poprzeczne oraz rozbudowana konstrukcja pasa górnego dźwigara głównego w miejscu połączenia z poprzecznicą w strefie zamocowania wspornika lin podwieszających

Remont mostu drogowego w Kłodzku

Remont mostu drogowego nad rzeką Nysą Kłodzką w ciągu ul. Kolejowej stanowi przykład wzmocnienia konstrukcji zespolonej z blachownicami stalowymi o schemacie statycznym belki ciągłej. Obiekt został wybudowany w latach siedemdziesiątych XX w. (rys. 5). Jest konstrukcją zespoloną sześcioprzęsłową stalowo-żelbetonową z jazdą górą. Rozpiętości teoretyczne przęseł wynoszą (licząc od strony miejscowości Zakliczyn): $47,0 + 47,0 + 57,0 + 65,0 + 57,0 + 47,0 = 320,0$ m. W projekcie wzmocnienia ustroju nośnego założono dostosowanie mostu do przenoszenia obciążenia klasy B według normy PN-S-10030:1985 i utrzymanie w czasie realizacji ruchu na obiekcie. Dopuszczono czasowe wprowadzenie ruchu jednokierunkowego.

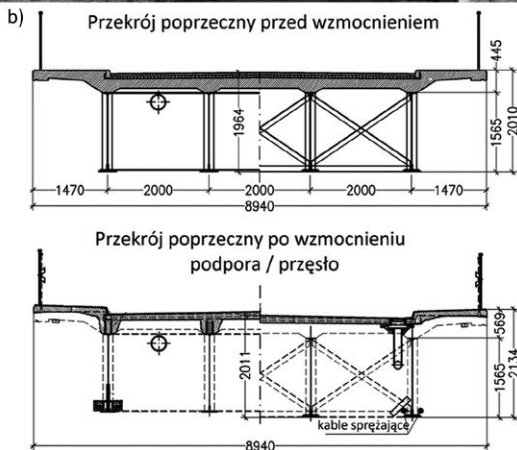
Zastosowanie sprężenia kablami zewnętrznymi umożliwiło zachowanie istniejącego przęsła mostu drogowego z jednoczesnym dostosowaniem go do wymaganej nośności odpowiadającej klasie B według PN-S-10030:1985. W pierwotnym projekcie przewidziano konieczność wymiany przęsła, co skutkowało znacznie zawyżonymi kosztami realizacji. Zastosowano tu sprężenie odcinkowymi kablami zewnętrznymi dźwigarów zespolonych, ze wzmocnieniem połączenia ścinanego w strefie zespolenia bezpośrednio nad miejscem zakotwienia

kabli [1]. Dodatkowo po sprężeniu wzmocniono płytę betonową przez jej nadbetonowanie. Sprężono skrajne dźwigary, a pomiary wykonywane podczas sprężania i obciążenia próbnego potwierdziły przyjęte założenia projektowe, w tym dotyczące poprzecznego rozdziału sprężenia. Wzmacniając istniejące przęsło, wykonane z dźwigarów z trudno spawalnej stali, znacznie zmniejszono koszty realizacji inwestycji w stosunku do proponowanego w koncepcji rozwiązania polegającego na wymianie przęsła na nowe (rys. 3). Zastosowano prostoliniowe kable i wzmocnienie strefy istniejącego zespolenia śrubami (rys. 4).

Odbudowa mostu w Zakliczynie

Most przez rzekę Dunajec zlokalizowany w km 46 + 023 drogi wojewódzkiej nr 975 jest przykładem wzmocnienia konstrukcji zespolonej z blachownicami stalowymi o schemacie statycznym belki ciągłej. Obiekt został wybudowany w latach siedemdziesiątych XX w. (rys. 5). Jest konstrukcją zespoloną sześcioprzęsłową stalowo-żelbetonową z jazdą górą. Rozpiętości teoretyczne przęseł wynoszą (licząc od strony miejscowości Zakliczyn): $47,0 + 47,0 + 57,0 + 65,0 + 57,0 + 47,0 = 320,0$ m. W projekcie wzmocnienia ustroju nośnego założono dostosowanie mostu do przenoszenia obciążenia klasy B według normy PN-S-10030:1985 i utrzymanie w czasie realizacji ruchu na obiekcie. Dopuszczono czasowe wprowadzenie ruchu jednokierunkowego.

Zastosowano sprężenie kablami odcinkowymi w układzie mijankowym (rys. 6), co było uzasadnione rozpiętością przęsła i unikaniem znacznych sił skupionych od sprężenia w miejscu zakotwienia. Problemy zespolenia i płyty pomostowej przedstawiono w [6]. Wzmocnienie czynne ustroju nośnego zaprojektowano jako sprężenie zewnętrzne pasów dolnych blachownic za



Rys. 3. Wzmocnienie konstrukcji mostu drogowego przez Nysę Kłodzką w ciągu ul. Kolejowej w Kłodzku: a) widok ogólny konstrukcji po wzmocnieniu, b) przekroje poprzeczne

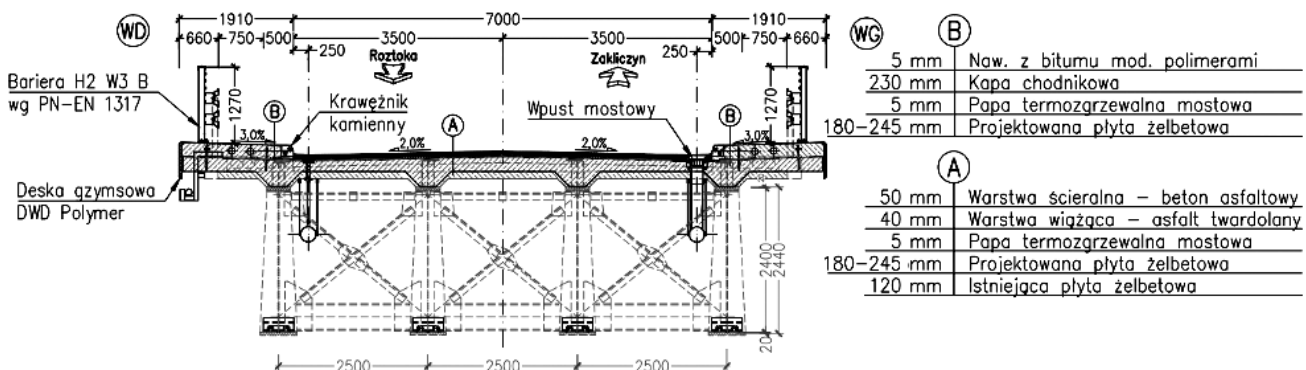


Rys. 4. Uźbierowanie w strefie zakotwienia kabla i śruby w pasie górnym jako wzmocnienie połączenia ścinanego zespolonego mostu w Kłodzku



Rys. 5. Most w Zakliczynie przed sprężeniem

statycznym belki ciągłej (rys. 10). Istniejący most został wzniesiony w 1964 r. jako siedmioprzęsłowy o konstrukcji stalowej. Ma cztery dźwigary kratowe, rozmieszczone poprzecznie w rozstawie 2,1 m, połączone stężeniami w poziomie pasa dolnego i pasa górnego kratownicy.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny mostu w Zakliczynie po przebudowie (przerwaną linią zaznaczono konstrukcję istniejącą)

pomocą kabli prostoliniowych (rys. 7 i 8). Sprężono wszystkie przęsła, z wyjątkiem jednego [6]. Zastosowano kable złożone ze splotów średnicy 15,7 mm, umieszczonych w osłonce z tworzywa sztucznego. Po naciągnięciu lin zabezpieczono je przez zainiektowanie zaczynem cementowym. Liczba lin w kablach wynosi od 3 do 7. Dźwigary skrajne, z wyjątkiem przęsła nr 2, sprężono czterema kablami (rys. 9), a dźwigary wewnętrzne i skrajny dźwigar w przęśle nr 2 – dwoma kablami. Liny były naciągane prasą typu „monojack”, co umożliwiło zmniejszenie bloków kotwiących. Naciąg lin wykonano po zabetonowaniu płyty pomostowej. Główną zaletą tego rozwiązania było uniknięcie wstrzymywania prac związanych z wykonaniem płyty pomostowej i montażem wyposażenia obiektu.

Przebudowa mostu drogowego w miejscowości Frankopol

Przebudowa mostu drogowego przez rzekę Bug w km 332+427 drogi krajowej nr 62 stanowi przykład wzmocnienia konstrukcji zespolonej z kratownicami stalowymi o schemacie



Rys. 7. Most w Zakliczynie – widok po zainstalowaniu kabli

Przebudowa mostu obejmowała naprawę uszkodzonych elementów jego podpór, wzmocnienie konstrukcji stalowej przęseł, wymianę pomostu z drewnianej dyliny na płytę żelbetową, z poszerzeniem szerokości użytkowych na obiekcie,

i przedłużenie chodnika na dojazdach do mostu. Podczas przebudowy zastosowano różne zabiegi technologiczne, w tym wzmocnienie konstrukcji przez sprężenie zewnętrzne kablami poziomymi odcinkowymi, w poziomie pasów dolnych dźwigarów kratowych. Sprężono konstrukcję stalową przed wykonaniem płyty betonowej, następnie wprowadzono dodatkowe zastrzały stalowe kształtujące docelowo kratownicę przestrzenną zespoloną z płytą pomostu. Wszystkie roboty były wykonywane przy utrzymanym ruchu kołowym. Z tych względów płyty pomostowej betonowano w kilku etapach na różnych odcinkach.

Szczególnie istotne były aspekty związane ze zmianą geometrii przęseł wskutek sprężenia i betonowania, tak aby uzyskać pożądany kształt, a także przejściowe sytuacje obliczeniowe z płytą wykonaną na części konstrukcji w aspekcie sztywności skrętnej przęseł. Zabiegi w postaci sprężania odcinkami prostych prętów ze stali o wysokiej wytrzymałości w połączeniu z zespoleniem z nową płytą pomostu umożliwiły realizację tego przedsięwzięcia bez wstrzymywania ruchu na obiekcie.

W literaturze [7] omówiono podobne rozwiązanie w postaci odcinkowych kabli sprężających w układzie mijankowym i zastrzałów w układzie V, zastosowane do wzmocnienia stalowej konstrukcji mostu im. Grota-Roweckiego w Warszawie; wzmocniono konstrukcję stalową o przekroju skrzyńkowym.

Podsumowanie

Omówiono wybrane realizacje, w których zastosowano sprężenie belek zespolonych. Takie sprężenie konstrukcji zespolonych jest rozwiązaniem uzasadnionym ekonomicznie w przypadku wzmocnienia istniejących przęseł belkowych mostów zespolonych. Osobną grupę stanowią obiekty podwieszane. W wykorzystywanej obecnie formule „projektuj i buduj”

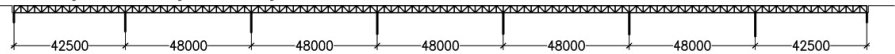


Rys. 8. Most w Zakliczynie po sprężeniu dźwigara skrajnego

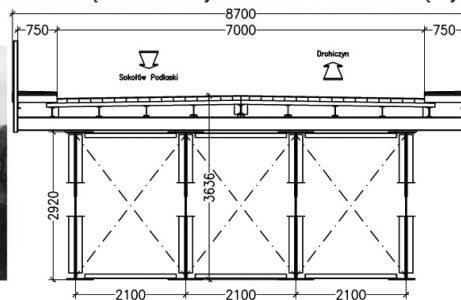


Rys. 9. Most w Zakliczynie – widok od spodu po sprężeniu

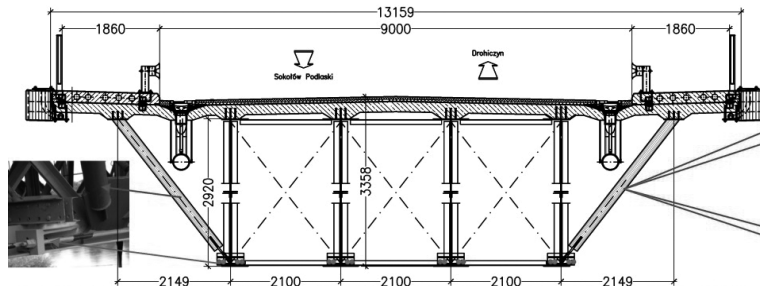
Schemat kratowej konstrukcji stalowej:



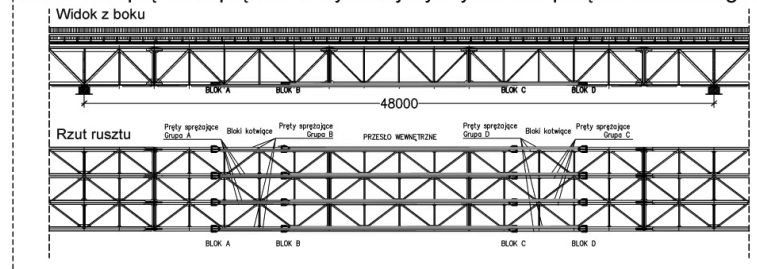
Stan przed przebudową: konstrukcja stalowa z drewnianą dyliwą



Stan po przebudowie: konstrukcja stalowa z zastrzałami sprężona i zespolona z płytą betonową



Schemat sprężenia prętami o wysokiej wytrzymałości przęśla środkowego:



Realizacja konstrukcji:



Rys. 10. Wzmocnienie mostu drogowego przez rzekę Bug w miejscowości Frankopol; zilustrowano skomplikowany proces wzmocnienia konstrukcji zespolonej z kratownicami stalowymi o schemacie statycznym belki ciągłej

sprężanie nowo projektowanych obiektów o przęsłach średniej rozpiętości ma znaczenie marginalne i w zasadzie nie jest stosowane, gdyż w odniesieniu do nośności belek w przęsle jest nieekonomiczne, a w przypadku strefy podporowej i zarysowania płyty nie jest w zasadzie konieczne. Projektowanie sprężenia w przypadku istniejących mostów należy traktować indywidualnie. Zazwyczaj stosuje się sprężenie odcinkowe, gdyż dodatkowe dewiatory powodują zwiększenie kosztów. Projektując tego rodzaju inwestycje, należy zwrócić szczególną uwagę na problem koncentracji naprężeń za dewiatorem w kontekście zmęczenia i tę strefę projektować ze szczególną starannością. W przypadku zakotwienia w przęsle superpozycja naprężeń od rozciągania pasa dolnego z naprężeniami lokalnymi od sprężenia może doprowadzić do powstania pęknięcia zmęczeniowego w pasie za konstrukcją bloku oporowego. W takim przypadku mogłoby się okazać, że sprężenie konstrukcji nie byłoby właściwe, a jego efekty mogłyby uwidocznić się dopiero po upływie pewnego czasu. Z uwagi na fakt, że brak jest obecnie takich doświadczeń, obiekty, w których takie niebezpieczeństwo istnieje, należałoby monitorować. Ponieważ spręża się raczej „stare” konstrukcje, w których stosowano stosunkowo cienkie blachy, wydaje się, że niebezpieczeństwo kruchego pęknięcia jest niewielkie, a powstałe pęknięcia można zatrzymać [8], stosując odpowiednie zabiegi.

Przedstawione w niniejszym artykule obiekty mostowe zostały zaprojektowane w firmie Promost Wrocław.

- [1] Lorenc W.: Nośność graniczna zespolonych belek stalowo-betonowych sprężanych kablami zewnętrznymi. Rozprawa doktorska. Raport serii PRE 17/04 2004, Politechnika Wroclawska.
- [2] Lorenc W., Kubica E.: Behavior of composite beams prestressed with external tendons: experimental study. "Journal of Constructional Steel Research", vol. 62, 2006.
- [3] Lorenc W., Kubica E.: Nonlinear modelling of composite beams prestressed with external tendons. "Archives of Civil and Mechanical Engineering", vol. 4, no 1/2004.
- [4] Machelski C., Biliszczuk J.: Raport serii SPR nr 21/96. Nadzór naukowy nad remontem mostu w miejscowości Ścibórz w ciągu drogi krajowej nr 408 Kłodzko – Gliwice. Badania efektywności sprężenia dźwigarów głównych za pomocą prostoliniowych kabli odcinkowych. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 1996.
- [5] Machelski C., Onysyk J., Prabucki P.: Wzmocnienie mostu zespolonego ze względu na przejazd nienormatywny. VIII seminarium pt. „Współczesne metody wzmocniania i przebudowy mostów”, Poznań 1998.
- [6] Budka E., Gruba S., Stempniewicz A., Wątroba P., Nowak W., Lorenc W., Rabięga J.: Sprężenie zewnętrzne i odbudowa wieloprzęsłowego ciągłego mostu zespolonego nad Dunajcem w Zakliczynie. „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej”, nr 16/2013.
- [7] Kasprzak A., Berger A., Nadolny A.: Poszerzenie i wzmocnienie mostu Gen. Stefana Grota-Roweckiego w Warszawie. X Jubileuszowe Wroclawskie Dni Mostowe pt. „Współczesne technologie budowy mostów”, Wrocław 27–28 listopada 2014.
- [8] Budka E., Lorenc W., Rabięga J.: Causes of cracks and the realized repair of main girder of steel railway viaduct. Steel bridges: advanced solutions & technologies: 7th International Conference on Steel Bridges: Guimaraes, Portugal, 4-6 June, 2008, ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2008.

Rys. 1. Schemat mostu