



Analiza nośności mostu DMS-65 opartego na barkach BP-150M według standardów MLC

JAN MARSZAŁEK, MIECZYŚLAW PIECHOTA,
BARTŁOMIEJ WÓJTOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Katedra Budownictwa Komunikacyjnego i Inżynierii Wojskowej,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
jan.marszalek@wat.edu.pl, mieczyslaw.piechota@wat.edu.pl,
wojtowicz.bartlomiej24@gmail.com

Streszczenie. Artykuł obejmuje analizę możliwości wykonania tymczasowej przeprawy kombinowanej z wykorzystaniem konstrukcji mostu DMS-65 i podpór pływających typu barka BP-150M. Aby skrócić czas budowy przeprawy, zastąpiono tradycyjne podpory stałe pływającymi. W celu szybkiego zaprojektowania takiej przeprawy opracowano przykładowe nomogramy, wykorzystując do tego metodę funkcji kompensacji momentów podporowych. Analiza obciążeń według standardów MLC pozwoliła określić parametry przeprawy przez most czołgów Abrams M1A2.

Słowa kluczowe: budownictwo, mosty składane, podpory pływające

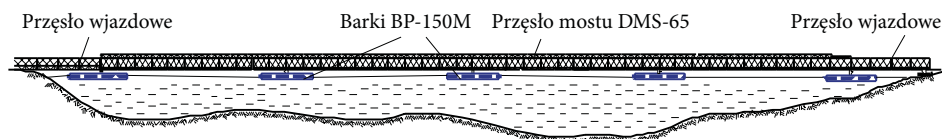
DOI: 10.5604/01.3001.0010.5395

1. Wprowadzenie

W artykule [4] przedstawiono metodykę szybkiego projektowania mostu składanego opartego na podporach pływających. Przedmiotem analizy był most składany DMS-65 oparty na podporach pływających zmontowanych z parku pontonowego PP-64. W pracy magisterskiej [7] oraz rozprawie doktorskiej [6] odniesiono się do możliwości budowy mostu DMS-65 na barkach pełnopokładowych BP-150M. W obecnych czasach czynnikiem determinującym wykonywanie przeprawy dla wojsk sojusznicznych i własnych jest czas wykonania mostu. Dlatego też

zdecydowano się zastąpić tradycyjne podpory stałe pływającymi. Konstrukcję DMS-65 wybrano ze względu na fakt, że występuje ona na wyposażeniu wojsk inżynierskich SZ RP oraz w zasobach Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją tych analiz i odnosi się dodatkowo do rozwiązania pozwalającego przeprowadzić przez most czołgi Abrams M1A2 — najcięższe pojazdy gąsienicowe będące na wyposażeniu wojsk sojuszniczych. W związku z tym należy wziąć pod uwagę też obciążenia według standardów MLC (*Military Load Classification* — Wojskowa Norma Obciążenia). Schemat takiej przeprawy kombinowanej z wykorzystaniem konstrukcji przęsłowej mostu DMS-65 oraz podpór pływających typu barka BP-150M przedstawia rysunek 1.1.



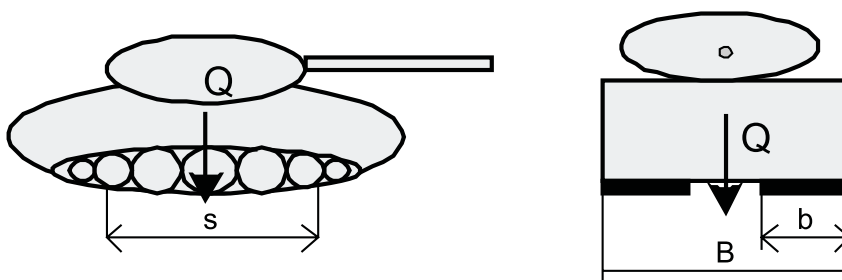
Rys. 1.1. Przykład przeprawy kombinowanej

2. Założenia projektowe

2.1. Klasyfikacja obciążeń według standardów MLC

Podstawowym dokumentem dotyczącym obciążeń mostów wojskowych jest STANAG 2021 [8]. Określono w nim zasady doboru obciążeń, klasyfikacji pojazdów oraz minimalne szerokości jezdni dla tych obciążeń.

MLC dotyczy mostów, wiaduktów, promów, tratw i pojazdów. Jest to numer klasy odpowiadający bezpiecznemu obciążeniu obiektu mostowego, wskazujący na maksymalną klasę pojazdów, które w normalnych warunkach mogą poruszać się po obiekcie mostowym i drodze. Maksymalne klasy pojazdów, które mogą bezpiecznie korzystać z drogi, zwykle odpowiadają najniższej klasie obciążenia obiektu mostowego na tej drodze. Wojskowy numer klasyfikacyjny jest tylko numerem, nie odpowiada on masie pojazdu. Jeżeli numer klasy pojazdu jest mniejszy lub równy numerowi klasy mostu, promu, drogi, to pojazd może przejechać przez dany obiekt, w przeciwnym przypadku musi on być zawrócony. Jako numer klasyfikacji wojskowej przyjęty został ciężar hipotetycznego pojazdu gąsienicowego wyrażony w tonach amerykańskich (1 US ton = 8,896 kN) [2]. Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat danych charakterystycznych pojazdów gąsienicowych hipotetycznych. W tabeli 2.1 ujęto parametry dla klas obciążenia MLC 60÷150 na podstawie schematu (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Schemat danych charakterystycznych pojazdów gaśnicowych

TABELA 2.1

Parametry charakterystyczne hipotetycznych pojazdów gaśnicowych według klas obciążenia MLC [2]

Obciążenie MLC	Obciążenie czołgowe			
	B [m]	b [m]	S [m]	Q [t]
60	3,35	0,71	4,27	54,43
70	3,51	0,79	4,57	63,50
80	3,66	0,84	4,88	72,58
90	3,81	0,89	5,18	81,65
100	3,96	0,94	5,49	90,72
120	4,27	1,02	6,1	108,86
150	4,67	1,27	7,32	136,08

Innymi parametrami projektowo-użytkowymi mostów są: szerokość jezdni, prędkość poruszania się pojazdów oraz odstęp pojazdów poruszających się w kolumnie. Dane te dla wybranych klas przedstawiono w tabeli 2.2.

TABELA 2.2

Parametry projektowe i użytkowe mostów według STANAG 2021 [2]

Wojskowa klasa obciążenia MLC	Minimalna szerokość jezdni według STANAG 2021	
	Jezdnia jednokierunkowa	Jezdnia dwukierunkowa
31-60	4,00 m (13 stóp i 1 cal)	7,30 m (24 stopy)
61-100	4,50 m (14 stóp i 9 cali)	8,20 m (27 stóp)
Prędkość pojazdu	powyżej MLC 30	
Zasadnicza	16 km/h (10 mil/h)	
Wskazana	25 km/h (15 mil/h)	
Odległość między pojazdami na moście 30,5 m (100 stóp)		

2.2. Charakterystyka obciążenia

W analizie przeprowadzonej w tym artykule uwzględniono możliwość przeprawy czołgu Abrams M1A2 (rys. 2.2) będącego na wyposażeniu wojsk sojuszniczych. Dane taktyczno-techniczne tego czołgu przedstawiono w tabeli 2.3.



Rys. 2.2. Czołg Abrams M1A2 [9]

TABELA 2.3

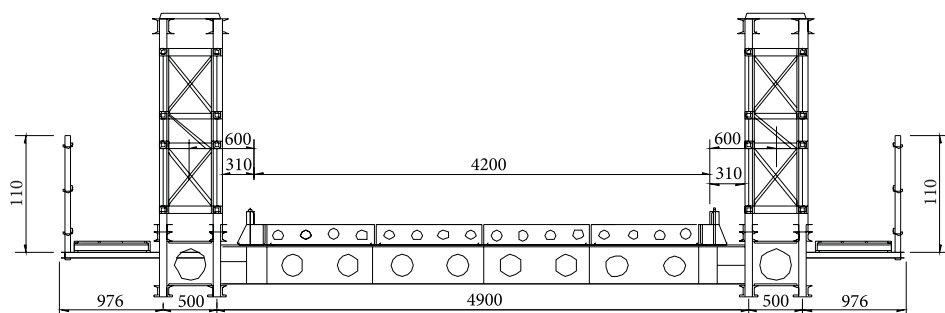
Dane taktyczno-techniczne czołgu Abrams M1A2 [9]

Lp.	Parametr	Wartość
1	Długość	7,90 m
2	Szerokość	3,65 m
3	Wysokość	2,44 m
4	Masa bojowa	65,0 t
5	Prędkość maksymalna	65 km/h

Masa bojowa pojazdu wynosi 65,0 t. Po planowanych modernizacjach masa bojowa ma sięgnąć 67-68 t. Dlatego też zgodnie z instrukcją STANAG 2021 kwalifikuje go do obciążenia MLC 80.

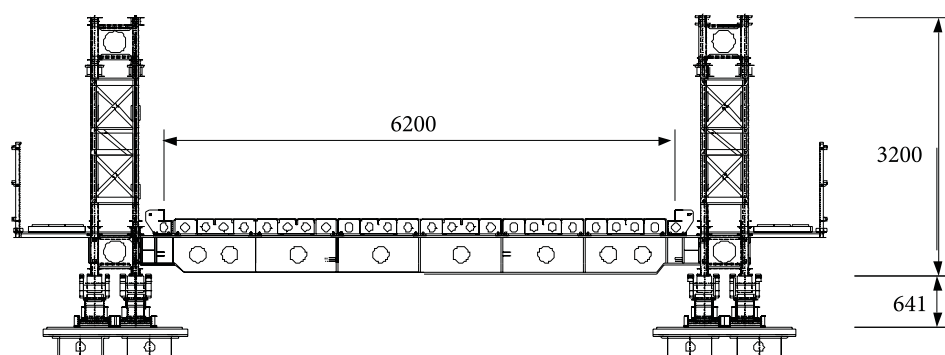
2.3. Charakterystyka konstrukcji przęsłowej

Do wykonania przęsła mostu użyto konstrukcji drogowego mostu składanego DMS-65. W układzie podstawowym most posiada jezdnię o szerokości 4,2 m. Konstrukcja ta składa się z dźwigarów kratowych (krata przestrzenna, krata płaska, tężnik) oraz elementów pomostu jezdni (belki poprzecznej, płyty jezdnej i układu wiatrownicowego) [5]. Maksymalne obciążenie wynosi 400 kN (uwarunkowane jest nośnością płyty jezdnej obciążonej pojazdem kołowym). Schemat przekroju poprzecznego mostu przedstawia rysunek 2.3. Szczegółowy opis techniczny konstrukcji mostu DMS-65 przedstawiono w pracy [3].



Rys. 2.3. Przekrój poprzeczny mostu DMS-65 w układzie podstawowym [3]

Przeprawienie przez ten most czołgów Abrams M1A2 w takim układzie jest niemożliwe ze względu na zbyt małą nośność mostu i szerokość jezdni. Analiza klasyfikacji MLC zmusza do zwiększenia nośności mostu do MLC 80 i szerokości jezdni w układzie jednokierunkowym do min. 4,50 m. Autorzy pracy [5] przedstawili koncepcję modernizacji tego mostu związaną z poszerzeniem jezdni oraz zwiększeniem nośności. W nowym rozwiązaniu zaproponowano układ dwudźwigarowy wzmocniony nakładką z poszerzeniem jezdni do 6,20 m. Schemat przekroju poprzecznego przedstawia rysunek 2.4. Taki układ zastosowano do przęseł pośrednich. W przęsłach wjazdowych uwzględniono układ bez nakładki.

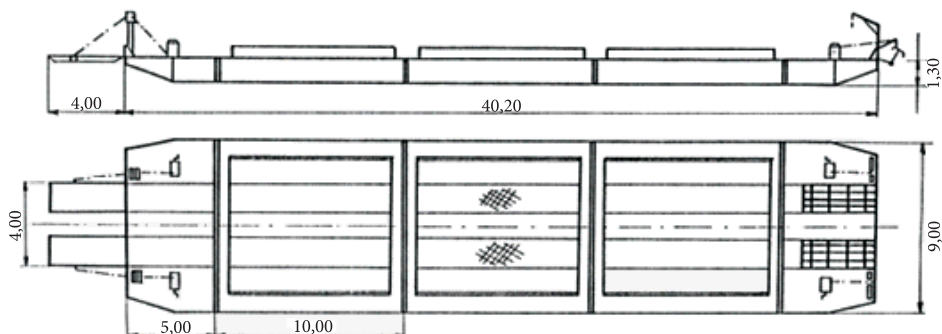


Rys. 2.4. Przekrój poprzeczny mostu DMS-65 z poszerzoną jezdnią wzmocnioną nakładką [5]

2.4. Charakterystyka podpory pływającej

Kolejnym założeniem w prowadzonej analizie było wykorzystanie berek BP-150M jako podpory przeprawy. Barka ta w układzie podstawowym (rys. 2.5) składa się z pięciu segmentów (trzech powtarzalnych środkowych oraz dwóch segmentów końcowych). Barki mogą być wykorzystywane jako samodzielne przeprawy kolejowe oraz drogowe. Na podstawowym wyposażeniu znajdują się: urządzenia wjazdowe,

urządzenia kotwiczne, latarnie burtowe, urządzenia bezpieczeństwa oraz wciągarki manewrowe. Dzięki segmentowej budowie możliwa jest różna konfiguracja barki, przez co zmianie ulega podatność podpory pływającej [3]. Konstrukcja przęsłowa została podparta na standardowych łożyskach (rys. 2.4).



Rys. 2.5. Schemat barki BP-150M [3]

Podstawowe parametry techniczno-użytkowe przedstawiono w tabeli 2.4.

TABELA 2.4

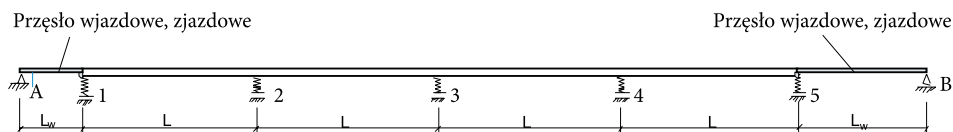
Parametry techniczno-użytkowe barki BP-150M [3]

Parametr	Wymiary główne [m]		
	barki	segmentu środkowego i skrajnego	segmentu końcowego
Długość całkowita	40,30	10,235	5,20
Długość konstrukcyjna	40,00	10,045	5,00
Szerokość całkowita	9,03	9,03	9,03
Szerokość konstrukcyjna	9,00	9,00	9,00
Wysokość w burcie	1,30	1,30	1,30
Zanurzenie barki od ciężaru własnego	0,25		

3. Obliczenia przeprawy

3.1. Założenia ogólne

Przeprawę zaprojektowano jako belkę ciągłą czteroprusłową połączoną przegubowo z dwoma pręsłami wjazdowymi (rys. 3.1). Pręsła wjazdowe były rozpatrywane w dwóch wariantach, o rozpiętości 12 i 30 metrów (ze względu na różne ukształtowanie brzegów przeszkody wodnej).



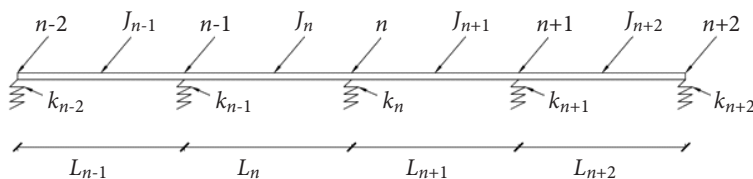
Rys. 3.1. Schemat statyczny przeprawy

Przy wykonywaniu obliczeń uwzględniono następujące parametry użytkowe:

- rozpiętość przęsła: 33, 36, 39, 42 m,
- wartość luzów: 0, 0,001, 0,002, 0,003,
- podatność podpory: 1800, 2700, 3600 kN/m.

W podejściu analitycznym wykorzystano metodę pięciu momentów oraz funkcję kompensacji momentów podporowych. Według autora [1] są to metody dokładne, dające najbardziej rzeczywiste wyniki w porównaniu z innymi metodami przybliżonymi.

Ogólne równanie metody pięciu momentów (3.1) odnosi się do układu podstawowego, który zakłada różne wartości sztywności oraz rozpiętości przęseł. Układ podstawowy został przedstawiony na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Układ podstawowy [1]

$$\begin{aligned}
 & M_{n-2} \frac{k_{n-1}}{L_n L_{n-1}} + M_{n-1} \left[\frac{L_n}{6EJ_n} - \frac{k_{n-1}}{L_n} \left(\frac{1}{L_{n-1}} + \frac{1}{L_n} \right) - \frac{k_n}{L_n} \left(\frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_{n+1}} \right) \right] + \\
 & + M_n \left(\frac{L_n}{3EJ_n} + \frac{L_{n+1}}{3EJ_{n+1}} + \frac{k_{n-1}}{L_n^2} + k_n \left(\frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_{n+1}} \right)^2 + \frac{k_{n+1}}{L_{n+1}^2} \right) + \\
 & + M_{n+1} \left[\frac{L_{n+1}}{6EJ_{n+1}} - \frac{k_n}{L_{n+1}} \left(\frac{1}{L_n} + \frac{1}{L_{n+1}} \right) - \frac{k_{n+1}}{L_{n+1}} \left(\frac{1}{L_{n+1}} + \frac{1}{L_{n+2}} \right) \right] + \\
 & M_{n+2} \frac{k_{n+2}}{L_{n+1} L_{n+2}} = - \left(\frac{R_{n,n-1}^f}{EJ_n} + \frac{R_{n,n+1}^f}{EJ_{n+1}} \right) - R_{n-1}^0 \frac{k_{n-1}}{L_n} + R_n^0 \left(\frac{k_n}{L_n} + \frac{k_n}{L_{n+1}} \right) - R_{n+1}^0 \frac{k_{n+1}}{L_{n+1}},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

gdzie: $k_n = \frac{1}{\gamma * F_n}$;

EI_n — sztywność przekroju poprzecznego konstrukcji n -tego przęsła;
 L_n — rozpiętość n -tego przęsła;

R_n^f — wtórna reakcja n -tej podpory w układzie podstawowym;
 R_n^0 — reakcja rzeczywista n -tej podpory w układzie rzeczywistym.

Przy budowie mostów przyjmuje się stałe odległości pomiędzy podporami oraz wykorzystuje ten sam rodzaj konstrukcji. Dzięki temu możemy założyć:

$$\begin{aligned} L_n &= L_{n+1} = L = \text{const} \\ J_n &= J_{n+1} = J = \text{const} \\ k_n &= k_{n+1} = k = \text{const}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

W konsekwencji wprowadzenia zależności (3.2) równanie 3.1 upraszcza się do formy 3.3 [1]:

$$\begin{aligned} &M_{n-2} \cdot \frac{k}{L^2} + M_{n-1} \left(\frac{L}{6EJ} - \frac{4k}{L^2} \right) + M_n \left(\frac{2L}{3EJ} + \frac{6k}{L^2} \right) + \\ &+ M_{n+1} \left(\frac{L}{6EJ} - \frac{4k}{L^2} \right) \cdot M_{n+2} \cdot \frac{k}{L^2} = \\ &= -\frac{1}{EJ} (R_{n,n-1}^f + R_{n,n+1}^f) - \frac{k}{L} (R_{n-1}^0 - 2R_n^0 + R_{n+1}^0). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Jeżeli przyjmiemy $\alpha = \frac{kL^3}{6EJ} = \frac{\gamma F_n L^3}{6EJ}$, to otrzymamy ostateczną postać (3.4) równania pięciu momentów [1]:

$$\begin{aligned} &M_{n-2} + M_{n-1}(\alpha - 4) + M_n(4\alpha + 6) + M_{n+1}(\alpha - 4) + M_{n+2} = \\ &= -\frac{6\alpha}{L} R_n^f - L(R_{n-1}^0 - 2R_n^0 + R_{n+1}^0). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Rozważając przyjęty schemat statyczny przeprawy, uzyskujemy układ trzech równań z trzema niewiadomymi (3.5), którymi są momenty podporowe:

$$\begin{cases} M_1(4\alpha + 6) + M_2(\alpha - 4) + M_3 = -\frac{6\alpha}{L} R_1^f - L(R_0^0 - 2R_1^0 + R_2^0) \\ M_1(\alpha - 4) + M_2(4\alpha + 6) + M_3(\alpha - 4) = -\frac{6\alpha}{L} R_2^f - L(R_1^0 - 2R_2^0 + R_3^0) \\ M_1 + M_2(\alpha - 4) + M_3(4\alpha + 6) = -\frac{6\alpha}{L} R_3^f - L(R_2^0 - 2R_3^0 + R_4^0). \end{cases} \quad (3.5)$$

Dodatkowo zastosowano funkcję kompensacji momentów podporowych. Funkcja ta ma duży wpływ na rozkład momentów podporowych. Zależy od wielkości występujących luzów w konstrukcji mostów składanych.

Algorytm postępowania przy wykorzystaniu funkcji kompensacji momentów:

- a) wyznaczenie reakcji fikcyjnych w układzie podstawowym,
- b) obliczenie maksymalnego kąta obrotu na podporach:

$$\varphi_n = \frac{\bar{R}_n^f}{EJ} + (m-1)\varphi_0, \quad (3.6)$$

gdzie: \bar{R}_n^f — reakcja fikcyjna;
 m — liczba elementów mostu w przęśle;
 φ_0 — luz w elementach konstrukcji,

- c) wyznaczenie funkcji kompensacji momentów podporowych:

$$F_n = 1 - \frac{\varphi_0}{\varphi_n}, \quad (3.7)$$

- d) obliczenie reakcji fikcyjnych w układzie rzeczywistym:

$$R_n^f = \bar{R}_n^f * F_n, \quad (3.8)$$

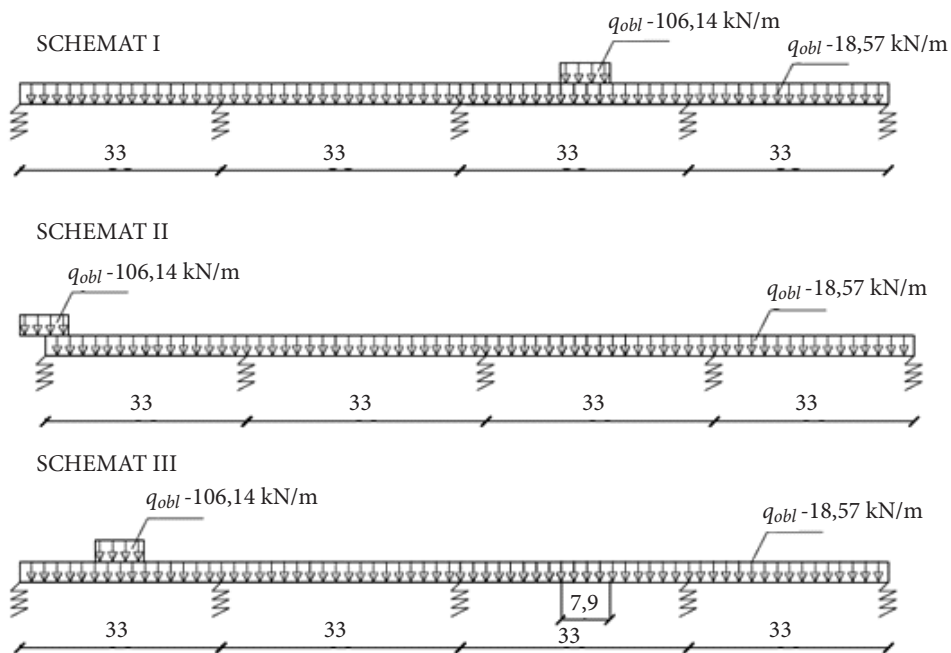
- e) obliczenie momentów podporowych z równania pięciu momentów,
- f) obliczenie momentów przęsłowych metodą superpozycji.

3.2. Obliczenia szczegółowe

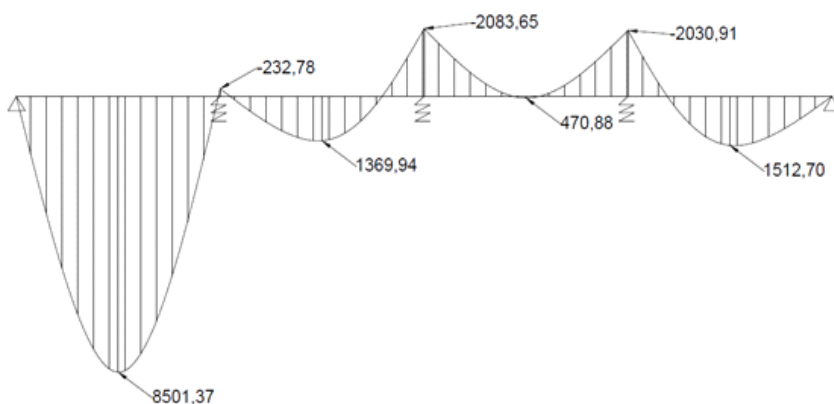
Schematy obciążenia, dla których przeprowadzono obliczenia, przedstawiono na rysunku 3.3. Przyjęto trzy schematy obciążenia: w pierwszym czołg znajduje się w środku rozpiętości przęsła pośredniego, w drugim obciążenie przyłożone zostało na podporze wjazdowej, a w ostatnim w środku rozpiętości pierwszego przęsła skrajnego. Aby rozwiązać układ równań, konieczne było zastosowanie metody funkcji kompensacji momentów podporowych.

Najbardziej niekorzystnym wariantem okazał się schemat numer III. Wyniki dla obliczeń metodami klasycznymi przedstawiono na rysunku 3.4. Wartości momentów zginających wyrażono w [kNm].

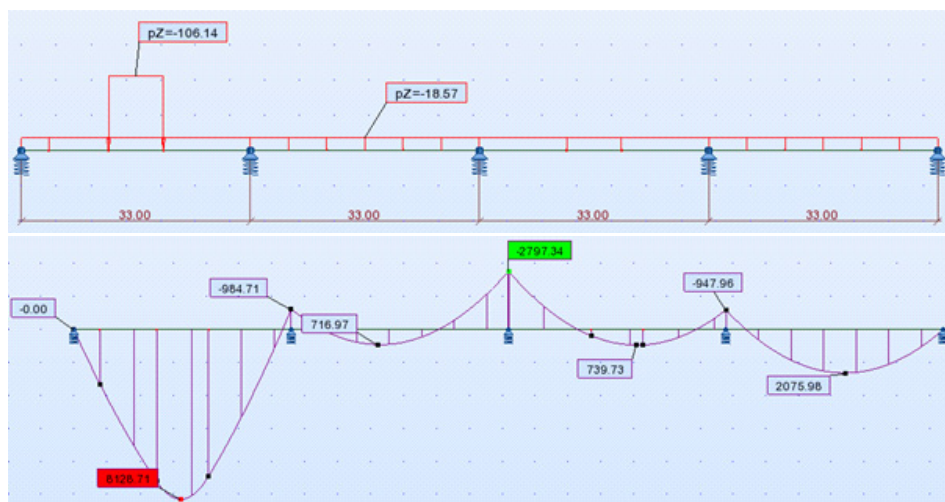
W pracy przeprowadzono również analizę numeryczną. W tym celu użyto programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014, który bazuje na metodzie elementów skończonych. Aby model w programie był poprawny, konieczne było wykorzystanie metody sztywności zastępczej. W obliczeniach przyjęto również podpory sprężyste o założonej podatności, żeby odwzorować rzeczywistą sytuację. Schemat obciążenia oraz wyniki przedstawiono na rysunku 3.5. Obciążenie wyrażono w [kN/m], rozpiętości przęseł w [m], a wartości momentów zginających w [kNm].



Rys. 3.3. Trzy warianty obciążenia przeprawy



Rys. 3.4. Wykres momentów zginających



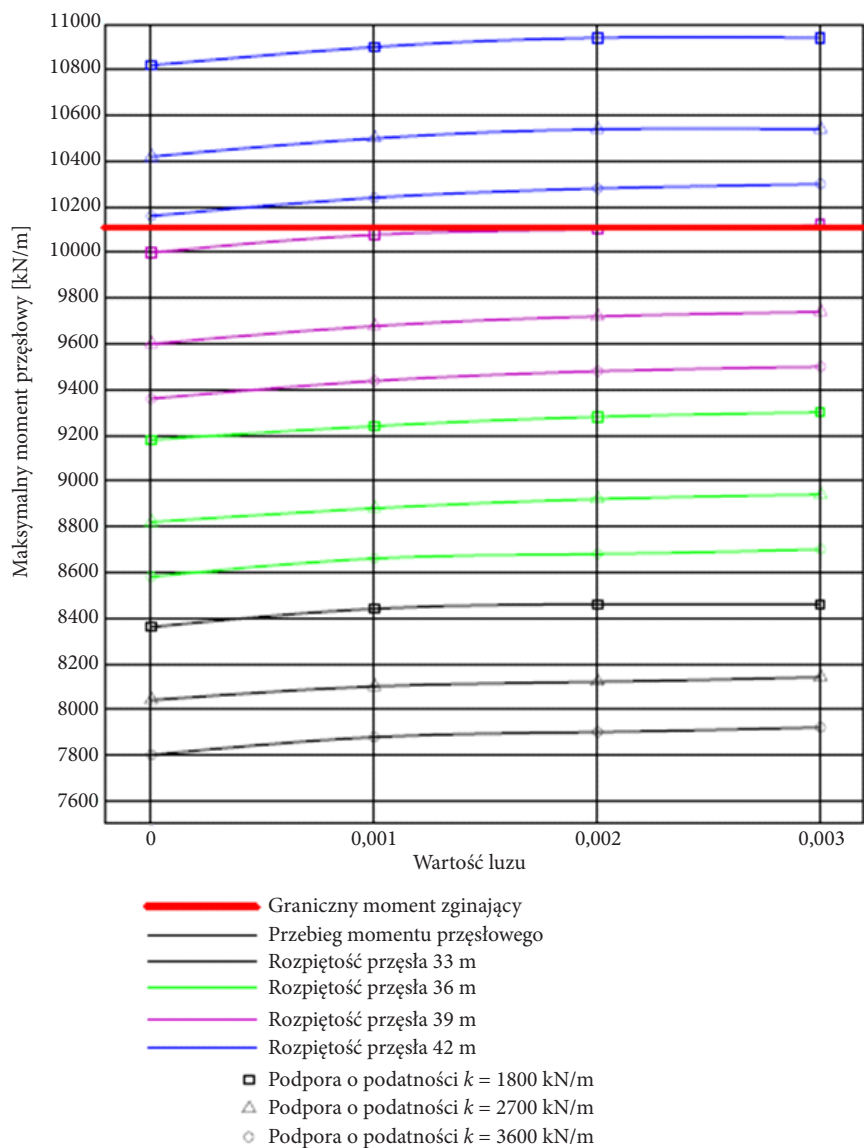
Rys. 3.5. Schemat obciążenia i wyniki obliczeń

3.3. Analiza zanurzenia podpór

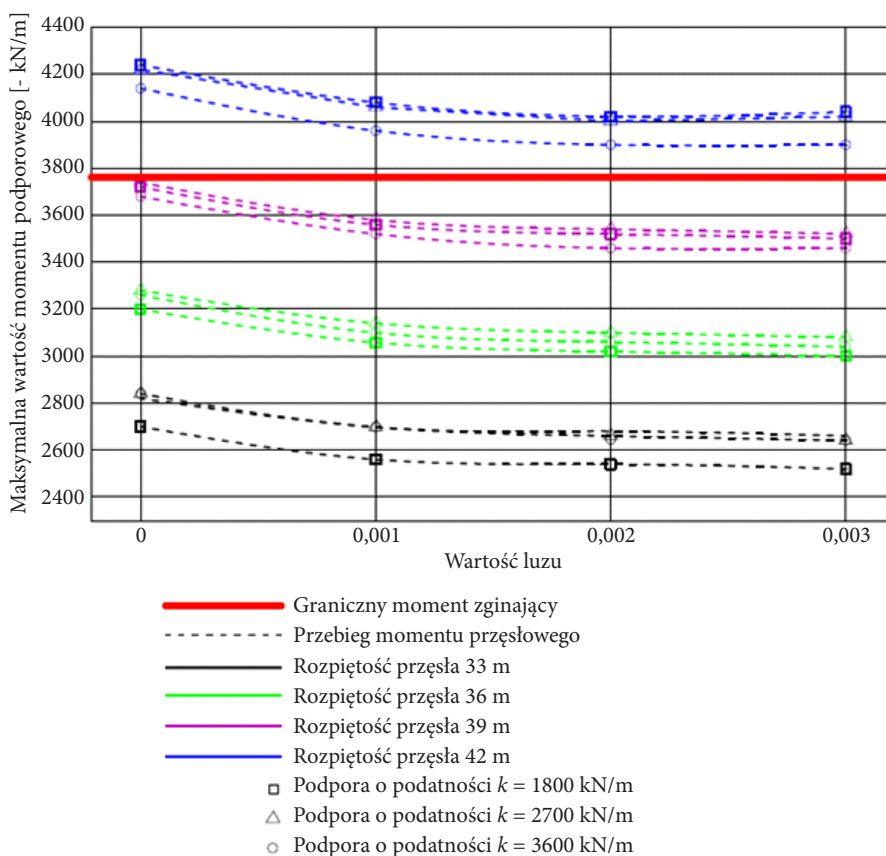
Szczegółowa analiza zanurzenia podpór pływających montowanych z berek rzecznych i promów przeprowadzona została w pracach [4] i [6]. Podatność podpory pływającej typu barka BP-150M wynosi 3300-3600 kN/m, a przedział jej wartości uzależniony jest od zmiennej długości segmentów końcowych barki (rys. 2.5). Zanurzenie barki od ciężaru własnego wynosi 0,25 m (tab. 2.4). Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy uwzględnieniu dodatkowo ciężaru konstrukcji mostu oraz obciążenia użytkowego czołgiem Abrams M1A2 maksymalne zanurzenie całkowite podpory wyniesie 0,80 m, zachowując tym samym zapas wolnej burty.

4. Opracowanie nomogramów

Nomogramy (rys. 4.1 i 4.2) zostały opracowane w celu szybkiego wyznaczenia maksymalnych momentów zginających. Umożliwia to dostosowanie różnych wariantów konstrukcji wynikających z uwarunkowań terenowych bez wykonywania dokładnych obliczeń. Uwzględniają one wartości momentów zginających dla wszystkich wcześniej wymienionych parametrów użytkowych. Przedstawione poniżej nomogramy opracowano na podstawie obliczeń metodą klasyczną z wykorzystaniem funkcji kompensacji momentów podporowych.



Rys. 4.1. Maksymalna wartość momentów przęsłowych dla różnych wariantów konstrukcji [7]



Rys. 4.2. Maksymalna wartość momentów podporowych dla różnych wariantów konstrukcji [7]

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule zaprezentowano przykładowe opracowanie nomogramów dla konkretnych danych mostu składanego DMS-65 w układzie podstawowym i podpór pływających o różnych podatnościach.

Przyglądając się opracowanym nomogramom, możemy stwierdzić, że wartość luzu nieznacznie wpływa na wartość momentu przęsłowego i podporowego. Różnica pomiędzy poszczególnymi wynikami dla różnych luzów wynosi 1-3%.

Przy rozpatrywaniu zależności wartości momentów od podatności podpory widać znaczący wpływ powierzchni barki na wartość momentów zginających. Należy zauważyć, że im większa powierzchnia podpory, tym moment przęsłowy jest mniejszy. Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku momentów podporowych.

Przeprowadzono także szersze analizy uwzględniające inne parametry mostu DMS-65 związane głównie z poszerzeniem jezdni i wzmocnieniem dźwigarów nakładką. Biorąc powyższe pod uwagę, można stwierdzić, że:

- maksymalne rozpiętości przęsła poszerzonego mostu DMS-65 opartego na bar-kach BP-150M dla przeprawy czołgu Abrams M1A2 wynoszą 39 m,
- takie rozwiązanie mostu kombinowanego spełnia warunki klasy obciążenia MLC 80 dla ruchu jednokierunkowego i MLC 30 dla ruchu dwukierunkowego.

Źródło finansowania — PBS-662/2017.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.06.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 21.09.2017 r.

LITERATURA

- [1] BURSZTYNOWSKI Z., *Mosty pływające na oddzielnych podporach*, WAT, Warszawa, 1988.
- [2] KRASOŃ W., WIECZOREK M., *Wytrzymałość mostów pływających w ujęciu komputerowym*, WAT, Warszawa, 2004.
- [3] MARSZAŁEK J. i in., *Mosty składane. Projektowanie, badania i eksploatacja*, podręcznik, Wydawca GDDKiA i WAT, Warszawa, 2005.
- [4] MARSZAŁEK J., PIECHOTA M., *Metoda szybkiego projektowania mostu składanego opartego na podporach pływających*, Biuletyn WAT, 65, 3, 2016.
- [5] MARSZAŁEK J., CHMIELEWSKI R., *Projekt koncepcyjny poszerzenia jezdni drogowego mostu składanego DMS-65 do 6,20 m*, WAT, Warszawa, 2005.
- [6] PIECHOTA M., *Analiza pracy mostów składanych na podporach podatnych obciążonych pojazdem w ruchu*, Rozprawa doktorska, Warszawa, 2016.
- [7] WÓJTOWICZ B., *Projekt przeprawy z mostu DMS na podporach pływających*, Praca magisterska, Warszawa, 2017.
- [8] STANAG 2021, *Wojskowe obliczenia klasyfikacji mostów, promów, tratw i pojazdów*, wydanie 6.
- [9] <https://pl.wikipedia.org>, data dostępu 30.06.2017 r.

J. MARSZAŁEK, M. PIECHOTA, B. WÓJTOWICZ

Analysis of the BP-150M barrier carrying capacity according to MLC standards

Abstract. The article includes an analysis of the possibility of a temporary combined crossing using the DMS-65 bridge construction and the BP-150M floating barge support. In order to shorten the construction time of the crossing, traditional floating supports are replaced. Examples of nomograms were developed, using the method of a compensation function of moments at supports. Load analysis according to MLC standards has made it possible to determine the parameters of crossing over the Abrams M1A2 tank bridge.

Keywords: building engineering, folding bridges, floating supports

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5395