

Podatność mostów zespolonych podczas ich budowy i eksploatacji

Flexibility of composite bridges during their construction and exploitation

prof. dr hab. inż. Czesław Machelski (ORCID: 0000-0002-1215-7908), Politechnika Wrocławska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8502

Streszczenie: W pracy analizuje się podatność mostów jako statyczną charakterystykę konstrukcji pod obciążeniem długotrwałym w postaci ciężaru własnego. Na podatność mostu istotny wpływ ma technologia jego budowy i zachodzące podczas eksploatacji procesy reologiczne. Może to być również degradacja materiału konstrukcji czy też osiadanie podpór. W praktyce utrzymaniowej obiektów mostowych obserwowane są zmiany niwelety jezdni jako wizualny wskaźnik stanu technicznego konstrukcji przęsła. Zmiany te ujęto w funkcji podatności eksploatacyjnej mostu. Z tych powodów każdy z rodzajów konstrukcji mostowych należy rozpatrywać indywidualnie. W pracy analizuje się mosty zespolone.

Słowa kluczowe: monitoring, mosty zespolone, podatność, obliczenia.

Abstract: The paper analyzes the flexibility of bridges as a static characteristic of the structure under long-term load in the form of its own weight. The susceptibility of the bridge is significantly influenced by the technology of its construction and the rheological processes occurring during operation. It can also be degradation of the structure material or subsidence of supports. In the maintenance practice of bridge structures, changes in the level of the roadway are observed as a visual indicator of the technical condition of the span structure. These changes are included in the function of operational vulnerability of the bridge. For these reasons, each of the types of bridge structures should be considered individually. The work analyzes composite bridges.

Keywords: monitoring, composite bridges, flexibility, calculations.

1. Wprowadzenie

W pracy rozpatruje się dwa parametry określające statyczną charakterystykę konstrukcji: sztywność, gdy analizowane są skutki obciążeń doraźnych (krótkotrwałych) oraz podatność dotyczącą stałego obciążenia, długotrwałego. Obciążeniami doraźnymi mostu są pojazdy zmieniające swoje położenie, czyli ruchome jako układ sił skupionych oddziałujących na jezdnie mostu [9]. Obciążeniem długotrwałym jest siła równomiernie rozłożona na długości przęsła, wynikająca z ciężaru własnego konstrukcji oraz wyposażenia mostu (nawierzchni jezdni i chodników oraz izolacji i urządzeń obcych). Na podatność mostu istotny wpływ ma technologia budowy obiektu i procesy reologiczne. Dlatego każdy z rodzajów konstrukcji mostowych należy rozpatrywać indywidualnie. Przykładem mogą być mosty budowane z zastosowaniem technologii wspornikowej [8, 11]. Najbardziej złożony stan montażowy występuje w mostach z prefabrykowanymi belek sprężonych [7]. W pracy analizuje się mosty o konstrukcji zespolonej.

Zwykle, w praktyce utrzymaniowej obiektów mostowych, obserwowane są zmiany niwelety jezdni jako wizualny wskaźnik stanu technicznego konstrukcji przęsła. Zmiany te ujęto w funkcji podatności eksploatacyjnej mostu. Gdy w obiekcie występują nadmierne ugięcia przęsła, prowadzony jest monitoring z użyciem geodezyjnych technik pomiarowych

[8, 9]. W przypadku mostów z betonu naturalne przyrosty ugięcia wynikają ze zmian cech fizycznych betonu ujętych w jego module ścisłości [2, 12]. W przypadku obciążeń długotrwałych istotne znaczenie mają procesy reologiczne w tym skurcz i pełzanie betonu [3, 4, 7, 11]. Zmiany niwelety mostu w eksploatowanym obiekcie mogą wynikać również z degradacji konstrukcji czy też osiadania podpór [6].

2. Podatność jako parametr statyczny obciążenia stałego

Podstawowymi obciążeniami mostów o schemacie belkowym są: ciężar stały konstrukcji ze zmiennymi oddziaływaniami pojazdów. W przypadku dźwigarów głównych takich mostów obciążenia stałe można odwzorować jako siłę równomiernie rozłożoną o intensywności g . W pracach [7, 9] podatność doraźna mostu definiowana jest jako proporcja maksymalnego ugięcia odniesionego do intensywności obciążenia stałego, równomiernie rozłożonego g , jak we wzorze:

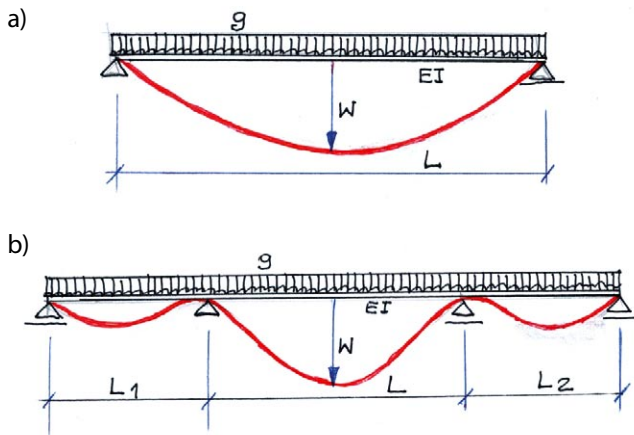
$$f = \frac{W}{g} = \Omega \text{ [m}^2\text{/Nm]} \quad (1)$$

Podatność mostu jest ściśle związana ze schematem statycznym, jak w przykładach podanych na rysunku 1. W przypadku schematu statycznego jako belki swobodnie podpartej o rozpiętości L i sztywności na zginanie EI wynosi:

$$f_a = \frac{5}{384} \frac{L^4}{EI} \quad (2)$$

Gdy układ konstrukcji jest trzyprzęsłowy o rozpiętościach $L_1 = L_2 = 0,7 L$ podatność bardzo znacząco spada do wartości:

$$f_b = \frac{1}{228,3} \frac{L^4}{EI} \quad (3)$$



Rys. 1. Ugięcie belki wywołane obciążeniem równomiernie rozłożonym

Odwrotnością podatności jest sztywność konstrukcji. W pracy [9] przyjęto sztywność konstrukcji mostu jako parametr charakterystyczny obiektów komunikacyjnych. Jego wartość określana jest ze wzoru:

$$k = \frac{P}{w} = \frac{1}{\eta} \text{ [kN/mm]} \quad (4)$$

gdzie:

w [mm] – jest największym ugięciem mostu wywołanym obciążeniem skupionym P [kN].

W przypadku obiektów o dużych rozpiętościach P może być ciężarem pojazdu. W obiektach krótkich konieczne jest korzystanie z linii wpływu ugięcia i jej największej rzędnej η [9].

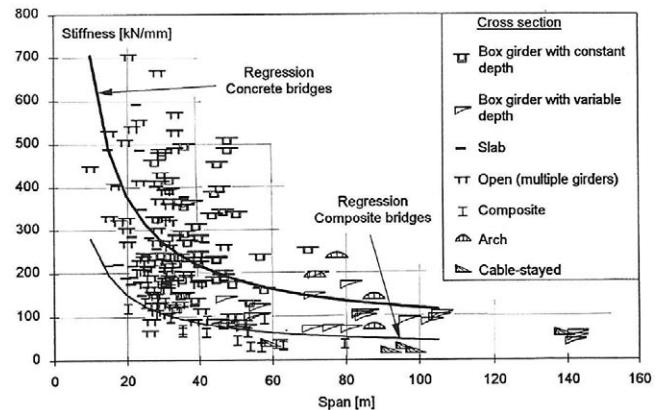
Gdy analizuje się ugięcie w środku rozpiętości przęsła, sztywność mostu z jego podatnością jest związana zależnością ujętą we wzorze:

$$\Omega = \int_0^{L_0} \eta \cdot dx \quad (5)$$

Zatem Ω jest maksymalnym ugięciem powstałym od obciążenia równomiernie rozłożonego $g = 1$ i równocześnie jest doraźną podatnością mostu. Gdy we wzorach (2) i (3) η jest maksymalną rzędną linii wpływu ugięcia, to Ω jest polem powierzchni funkcji $\eta(x)$ na długości całego mostu L_0 .

Wyniki badań około 100 mostów wybudowanych w Szwajcarii [9] przedstawiono na rysunku 2. Badano mosty o zróżnicowanej konstrukcji i schematach statycznych. Wyróżniono na tym rysunku dwie grupy mostów z uwagi na materiał użyty do ich budowy: betonowe i zespolone. Gdy porówna się wartości k tych mostów, widoczne jest, że mosty zespolone wykazują się najniższą sztywnością. W wartościach k

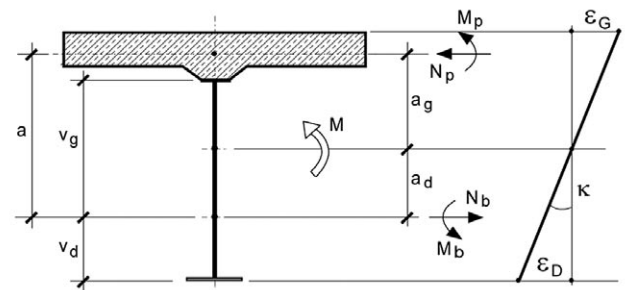
widoczna jest tendencja do małych wartości w obiektach o dużych rozpiętościach L . Zatem podatność mostów zespolonych będzie najwyższa.



Rys. 2. Wyniki badań terenowych sztywności mostów drogowych [9]

3. Podatność jako funkcja pełzania betonu

W przypadku mostów zespolonych [4, 5, 7] istotne znaczenie ma pełzanie betonu płyty pomostowej oraz wynikające stąd siły wewnętrzne w przekroju poprzecznym dźwigara zespolonego, jak na rysunku 3. Jedynym rozpatrywanym w tym rozdziale zjawiskiem, które wpływa na zmiany odkształceń jest pełzanie betonu płyty pomostowej, występujące jako efekt obciążenia stałego konstrukcji zespolonej. W analizowanym przekroju poprzecznym jest to moment zginający M . Zwykle w rozwiązaniach [4, 7] rozkłada się go na statycznie zrównoważony układ sił w płycie (indeks p) i stalowej belce (indeks b), jak na rysunku 3.



Rys. 3. Siły składowe i krzywizna przekroju belki zespolonej

W niniejszej pracy wykorzystuje się zależność wytrzymałościową w postaci proporcji momentów M do sztywności na zginanie EI zgodnie z równaniem:

$$\kappa(\varphi) = \frac{M_b(\varphi)}{EI_b} = \frac{M}{EI(\varphi)} \quad (6)$$

We wzorze (6) występują dwie stałe wartości: globalny moment zginający M oraz sztywność stalowej belki EI_b . Zmiennymi są: moment zginający stalową belkę $M_b(\varphi)$ oraz sztywność przekroju zespolonego $EI(\varphi)$. Zależą one w tym przypadku wyłącznie od funkcji pełzania betonu

plyty pomostowej $\varphi(t)$, gdy t jest czasem obciążenia konstrukcji, liczonym po zespoleniu.

W omawianym zagadnieniu istotne znaczenie ma moment $M_b(\varphi)$, jak we wzorze (6). Z tego powodu wprowadza się związek momentów zginających opisany zależnością:

$$M_b(\varphi) = M \cdot \mu(\varphi) \quad (7)$$

Funkcja $\mu(\varphi)$ we wzorze (7) wynika więc z zależności statycznej. Można ją również uzasadnić [7], korzystając ze związku geometrycznego wynikającego z porównania momentów bezwładności:

$$I(\varphi) \cdot \mu(\varphi) = I_b \quad (8)$$

Gdyby pominąć sztywność EI_p , o niewielkiej wartości w porównaniu do EI_b , uzyskać można następującą zależność [7]:

$$\frac{1}{\mu} = 1 + \frac{A_b \cdot a}{I_b} a_d(\varphi) \quad (9)$$

Ze wzoru (9) wynika postać funkcji $\mu(\varphi)$ jako związek stałych parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego z funkcją pełzania. Parametry geometryczne części składowych przekroju poprzecznego (A – pole powierzchni, I – moment bezwładności). Wielkość $a_d(\varphi)$ oznacza zmienną odległość środka ciężkości belki od globalnego środka ciężkości dźwigara.

W obliczeniach geometrię płyty pomostowej sprowadza się do jednolitego materiału (belki) na podstawie modułów Younga, zgodnie ze wzorem:

$$n(t) = \frac{E_b}{E_p(t)} [1 + \varphi(t)] \quad (10)$$

We wzorze (10) uwzględnia się $E_p(t)$ betonu płyty pomostowej. Obydwie wielkości fizyczne $E_p(t)$ i $\varphi(t)$ są zmiennymi funkcjami czasu. W pierwszym przypadku czas jest liczony od momentu wykonania płyty pomostowej zaś w drugim od chwili wystąpienia obciążenia konstrukcji zespolonej.

Odległość środków ciężkości belki i płyty, oznaczona jako a , jest wielkością stałą, jak na rysunku 3. Wzajemne odległości tych elementów od globalnej osi bezwładności przekroju zespolonego zależą od funkcji $n(t)$, według wzorów:

$$a_d(n) = \frac{a \cdot A_{pn}}{A_b + A_{pn}} \quad (11)$$

gdzie sprowadzone (równoważne) pole przekroju płyty pomostowej można wyrazić za pomocą wzoru:

$$A_{pn} = A_p / n(t) \quad (12)$$

W wyniku analiz wielu przykładów geometrii dźwigarów głównych mostów zespolonych przyjęto w artykule ogólną zależność parametrów przekroju i pełzania, w postaci:

$$\mu = \frac{G}{c} (c + \varphi) = G \left(1 + \frac{\varphi}{c} \right) \quad (13)$$

Przykładowe wartości G i c w przypadku wybranych przęseł mostowych o konstrukcji zespolonej zestawiono w tabeli 1. Parametry geometryczne mostów zaczerpnięto z literatury. Mosty oznaczone literami A, B i C to mosty drogowe, natomiast litera D dotyczy mostu kolejowego. W obliczeniach tych przyjęto jednakową wartość $E_b/E_p = 6,25$.

Wartość parametru G zależy głównie od geometrii przekroju dźwigara i wpływa proporcjonalnie na funkcję μ . Jest więc parametrem charakterystycznym konstrukcji mostu, a jego wartość może być obliczana ze wzoru:

$$\frac{1}{G} = 1 + \frac{A_b \cdot A_p \cdot a^2}{I_b (n \cdot A_b + A_p)} \quad (14)$$

gdy przyjmie się $\varphi = 0$ oraz $n = E_b/E_p = 6,25$ i dodatkowo pominie się niewielką sztywność EI_p . Z wartości parametrów G oraz c zestawionych w tabeli 1 dla losowo wybranych obiektów mostowych widoczne są niewielkie różnice. Parametr c uwikłany jest z funkcją pełzania $\varphi(t)$. Jego wartość określona jest również jako wielkość stała.

Funkcja podatności wynikająca z pełzania betonu jest więc określona jako:

$$f(\varphi) = f \cdot \left(1 + \frac{\varphi}{c} \right) \quad (15)$$

W równaniu (15) f jest podatnością doraźną, w której ujęty jest schemat statyczny konstrukcji mostu, jak we wzorach (2) i (3), gdy EI jest sztywnością dźwigara głównego.

Tabela 1. Charakterystyki geometryczne dźwigarów zespolonych

Parametry	Analizowane przęsło mostu			
	A	B	C	D
A_b [m ²]	0,0448	0,0600	0,0444	0,0550
I_b [m ⁴]	0,01920	0,03567	0,02547	0,02346
A_p [m ²]	0,5820	0,6000	0,8614	0,6000
I_p [m ⁴]	0,002125	0,00200	0,00880	0,0031
a [m]	1,135	1,534	1,663	1,418
G	0,3282	0,2903	0,2127	0,2728
c	5,5	4,5	5,5	4,5
G/c	0,05067	0,06451	0,03867	0,06062

swobodnie podpartego. Parametry tego mostu, o rozpiętości $L = 41$ m (oznaczonego jako C) zestawiono w tabeli 1. W trakcie eksploatacji mostu powstało trwałe ugięcie $w = 100$ mm.

W stanie montażowym obiektu, gdy podstawowym elementem konstrukcji jest stalowa blachownica ze stężeniami, przed zespoleniem z płytą pomostową podatność jest określana jako:

$$f_m = \frac{5}{384} \frac{L^4}{E_b I_b} = \frac{5}{384} \frac{41^4}{205 \cdot 10^3 \cdot 0,02547} = 7,05 \text{ m}^2/\text{MN} \quad (22)$$

Dotyczy ona ciężaru konstrukcji jak również płyty w fazie układania mieszanki betonowej. Po zespoleniu betonu płyty pomostowej z blachownicą podatność konstrukcji podlega wyraźnej redukcji wraz ze wzrostem modułu Younga $E_p(t)$. Gdy $E_b/E_p = 6,25$ otrzymuje się wartość:

$$f_z = f_m \cdot G = 7,05 \cdot 0,2127 = 1,50 \text{ m}^2/\text{MN} \quad (23)$$

Taka podatność doraźna dotyczy końcowej fazy budowy a więc sytuacji układania nawierzchni i pozostałych elementów wyposażenia.

Gdy uwzględnia się pełzanie betonu i obciążenie stałe konstrukcji po zespoleniu podatność wzrasta do wartości:

$$f_\varphi = f_z \cdot \left(1 + \frac{\varphi}{c}\right) = 1,50 \cdot \left(1 + \frac{2}{5,5}\right) = 2,045 \text{ m}^2/\text{MN} \quad (24)$$

W obliczeniach przyjęto współczynnik pełzania $\varphi = 2$. Z wartości $c = 5,5$ określonej w tabeli 1 wynika bardzo duża redukcja zmiany sztywności przęsła $EI(\varphi)$.

Wpływ skurczu betonu na zmiany krzywizny określony jest jak we wzorze (16):

$$\kappa(\varepsilon_{sk}) = \frac{0,0444}{0,02547} \cdot 0,8457 \cdot 0,290 \cdot \varepsilon_{sk} = 0,4276 \cdot \varepsilon_{sk} \quad (25)$$

Ze wzoru (18) uzyskuje się ugięcie, gdy $\varepsilon_{sk} = 20 \cdot 10^{-5}$:

$$w(\varepsilon_{sk}) = \frac{41^2}{8} \cdot 0,4276 \cdot 20 \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (26)$$

Zatem ugięcie jest znaczne, jednak w dużej mierze zależy od zastosowanej technologii pielęgnacji betonu.

Gdy podatność eksploatacyjną określa się ją na podstawie przyrostu ugięcia $w(t)$, jak we wzorze (13), wówczas zgodne z definicją odnosi się zmianę ugięcia do obciążenia stałego g . Zatem w analizowanym przypadku gdy pomiary referencyjne rozpoczyna się przy ugięciu $w_r = 70$ mm, a pomiar końcowy wynosi $w_a = 100$ mm zmiana podatności eksploatacyjnej z tego okresu pomiarowego wynosi:

$$f(t) = \frac{w(t)}{g} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 10^{-3}} = 0,857 \text{ m}^2/\text{MN} \quad (27)$$

Wartość $g = 35$ kN/m jest ciężarem stałym dźwigara pochodzącym od blachownicy i płyty pomostowej oraz wyposażenia. Obciążenia te w różnym stopniu wpływają na podatność tego elementu konstrukcji. Zatem w przypadku

złożonych układów konstrukcyjnych podatność eksploatacyjna jest jedynie wskaźnikiem uzyskanym z monitoringu obiektu. Nie ma więc ścisłego uzasadnienia fizycznego, które występuje w układach jednorodnych np. w moście z betonu zbrojonego. W mostach z betonu sprężonego dodatkowy wpływ na $w(t)$ powodują straty sprężenia a czasem zarysowanie betonu.

7. Podsumowanie

W pracy rozpatrywano dwa ujęcia podatności. Podatność doraźna jest odwrotnością sztywności konstrukcji zatem jest parametrem, w którym uwzględnia się efekt obciążenia krótkotrwałego. W funkcji podatności ujmuje się zmiany cech fizycznych materiałów, w tym skutki procesów reologicznych i degradacji konstrukcji [4, 5, 6, 10, 11, 12]. Podatność mostu jest statyczną charakterystyką konstrukcji obiektu pod obciążeniem długotrwałym. Jest nim ciężar własny konstrukcji z wyposażeniem mostu (nawierzchnią jezdni i chodników oraz izolacją i urządzeniami obcymi). Na podatność mostu istotny wpływ ma technologia budowy obiektu. Zatem każdy z rodzajów konstrukcji należy rozpatrywać indywidualnie.

Użyteczną w praktyce utrzymywanej obiektów mostowych jest podatność eksploatacyjna. Wyznacza się ją na podstawie obserwacji zmiany niwelety jezdni jako wizualny wskaźnik stanu technicznego konstrukcji przęsła. Znaczne przyrosty obserwuje się w mostach dużych rozpiętości z betonu sprężonego [11]. Mosty zespolone charakteryzują się małą sztywnością jak również małym przyrostem podatności. Na ten efekt ma wpływ duża wartość parametru c analizowanego w pracy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bažant Z., Hubler M. H., Qiang Y., Excessive Creep Deflections: An Awakening. Concrete International, tom 33, 8/2011, str. 44–46
- [2] Brunarski L., Podstawy reologii konstrukcji z betonu. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2019
- [3] Flaga K., Pełzanie betonu według Eurokodu, Inżynieria i Budownictwo 3–4/2002
- [4] Furtak K., Mosty zespolone, PWN, Warszawa-Kraków, 1999
- [5] Kuczma M., Kuczma B., Analiza belek zespolonych o podatnych łącznikach metodą elementów skończonych, Konferencja Konstrukcje zespolone, Zielona Góra 19–20 czerwca 2008 r., str. 255–270
- [6] Kuźawa M., Monitoring sensoryczny obiektów mostowych w trakcie ich eksploatacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2023
- [7] Machelski C., Funkcje deformacji dźwigarów głównych z okresu eksploatacji mostów zespolonych, Main girder deformation function from service life of composite Bridges, Drogi i Mosty Road and Bridges, tom 21, 3/2022, str. 217–237
- [8] Machelski C., Linia ugięcia mostów betonowych jako efekt obciążeń stałych, Inżynieria i Budownictwo 7–8/2022, str. 139–142
- [9] Machelski C., Sztywność i podatność jako wskaźniki wrażliwości dynamicznej i reologicznej mostów, Konferencja Wrocławskie Dni Mostowe, 24–25 listopad 2022 r., str. 387–395
- [10] Machelski C., Toczkiwicz R., Identification of Connection Flexibility Effects Based on Load Testing of a Steel-Concrete Bridge, Steel Construction Design and Research 1/2016, str. 58–66
- [11] Radomski W., Kilka uwag o efektach pełzania w konstrukcjach mostowych z betonu sprężonego, Obiekty inżynierskie 2/2012, str. 15–25
- [12] Rüscher H., Jungwirth D., Skurcz i pełzanie betonu w konstrukcjach betonowych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1979