A R C H I W U M I N S T Y T U T U I N Ż Y N I E R I I L Ą D O W E J
Nr 24 ARCHIVES OF INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERING 2017

BUDOWA LINII DUŻYCH PRĘDKOŚCI W CHINACH –OBIEKTY MOSTOWE O MAŁEJ ROZPIĘTOŚCI PRZĘSŁA[1]

Wojciech SIEKIERSKI
Politechnika Poznańska

Od około 25 lat w Chinach trwa realizacja programu budowy sieci linii kolejowych dużych prędkości. Przyjęto koncepcję budowy całkowicie nowej, dedykowanej infrastruktury inżynieryjnej. Chińska norma projektowania obiektów mostowych na liniach dużych prędkości jest zbieżna z zapisami norm europejskich, ale przewiduje ruch z prędkością 250, a także 350 km/h. Stany graniczne użytkowalności dotyczące obiektów w ciągu linii dużych prędkości są przyjęte podobnie jak w normach PN-EN. Różnice dotyczą m.in. wartości sił w znanym z normy PN-EN modelu obciążenia LM71. System obiektów mostowych opracowany na potrzeby obsługi linii dużych prędkości bazuje na ustrojach sprężonych. Znaczna większość wnoszonych obiektów składa się z przęseł swobodnie podpartych. Wymagania stawiane obiektom mostowym w Chinach są zbieżne z wymaganiami norm PN-EN.

Słowa kluczowe: linie dużych prędkości, system obiektów mostowych, stany graniczne.

1. WPROWADZENIE

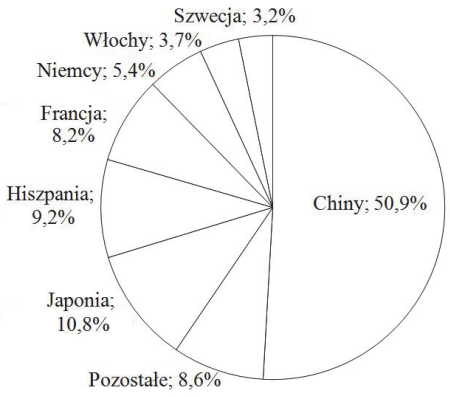
W latach dziewięćdziesiątych XX wieku zainicjowano w Chinach program budowy sieci linii kolejowych dużych prędkości. W ostatniej dekadzie nastąpił tam gwałtowny rozwój tej formy komunikacji. Do roku 2020 planuje się wybudowanie łącznie 20 tys. km linii kolejowych dużych prędkości (na wcześniej budowanych liniach obowiązuje prędkość 250 km/h, a na nowszych – 350 km/h), które połączą miasta liczące 5 milionów mieszkańców lub więcej. W chwili obecnej na terenie Chin zlokalizowana jest połowa długości wszystkich linii kolejowych dużych prędkości wybudowanych na świecie – rys. 1 [1].

W konsekwencji rządowego programu badawczo-rozwojowego w 2009 opublikowano normę projektowania linii dużych prędkości. Norma wyróżnia dwie zasadnicze prędkości projektowe: 250 i 350 km/h. Dokument składa się z 22 rozdziałów, które dotyczą m.in.: trasowania, nasypów i podtorza, obiektów inżynierskich, nawierzchni, stacji, zasilania, łączności, sygnalizacji, taboru, ochrony środowiska. W części dotyczącej obiektów inżynierskich zawarto zale-

[1] DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.23

cenie dotyczące: obciążeń, warunków ograniczających deformacje konstrukcji i częstości jej drgań własnych, analizy konstrukcji, konstruowania i szczegółowych rozwiązań pomostu. W normie przyjęto następujący podział obiektów[2]:

– obiekty o małej rozpiętości przęsła, tj. do 100 m,
– obiekty o średniej rozpiętości przęsła, tj. 100÷200 m,
– obiekty o dużej rozpiętości przęsła, tj. 200÷500 m.



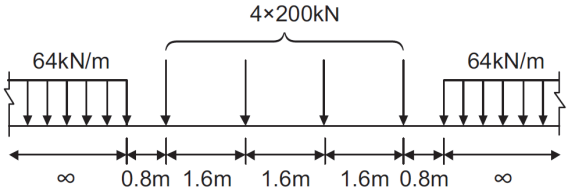
Rys. 1. Długość linii dużych prędkości w poszczególnych państwach w stosunku do długości całkowitej wszystkich linii tego rodzaju

W niniejszej pracy zaprezentowano wybrane reguły projektowania obiektów mostowych wg normy chińskiej oraz scharakteryzowano system obiektów mostowych o przęsłach małej rozpiętości (do 100 m) przeznaczonych do obsługi linii dużych prędkości. Tam gdzie było to możliwe, informacje zestawiono z odpowiednimi wytycznymi przepisów obowiązujących w Polsce.

2. NORMOWE OBCIĄŻENIA ZMIENNE

W Chinach, w przypadku obiektów mostowych w ciągu linii dużych prędkości dedykowanych komunikacji pasażerskiej, przyjęto obciążenie taborem podobne do obowiązującego w normie PN-EN [3] obciążenia LM71 – tzw. model obciążenia ZK. Model ten można stosować jako obciążenie „standardowe" (rys. 2) i jako obciążenie „specjalne". W pierwszym przypadku geometria modelu jest podobna do obciążenia LM71, natomiast wartości sił skupionych i obciążenia równomiernie rozłożonego są równe 80% podstawowych wartości obciążenia „europejskiego". Wartości obciążeń przyjęte w Chinach można traktować jak wartości sklasyfikowanych obciążeń wg PN-EN ze współczynnikiem dostosowawczym α=0,80. Model ZK, jako obciążenie „specjalne", tworzą wyłącznie cztery siły skupione o wartości 250 kN każda.

Podane wyżej, przyjęte w normie, wartości obciążeń w modelu „standardowym" budzą w Chinach kontrowersje – w części ośrodków badawczych uznaje się je za zawyżone i proponuje się wartości odpowiadające współczynnikowi dostosowawczemu α=0,60.



Rys. 2. Model obciążenia ZK „standardowy”

Obowiązujące w Polsce Standardy Techniczne [4], zalecają stosowanie obciążenia LM71 lub SW/0 (w przypadku mostów wieloprzęsłowych o konstrukcji ciągłej) ze współczynnikiem dostosowawczym: α=1,21. Mała wartość współczynnika dostosowawczego w Chinach wynika stąd, że obciążenie ZK odzwierciedla wyłącznie ruch pasażerski.

Oddziaływania dynamiczne obciążenia ZK w Chinach należy uwzględniać za pomocą dodatkowego mnożnika – współczynnika dynamicznego:

$$\varphi = \frac{1{,}44}{\sqrt{L_\varphi} - 0{,}2} + 0{,}82 \tag{1}$$

gdzie: L_φ – rozpiętość obliczeniowa, przy czym:
– $L_\varphi = L_t$ – w przypadku przęsła swobodnie podpartego,
– $L_\varphi = L_{śr} \cdot (1+n/10)$ – w przypadku układu ciągłego o liczbie przęseł n=2÷5; $L_{śr}$ – rozpiętość średnia przęsła,
– $L_\varphi = L_{śr} \cdot 1{,}5$ – przypadku układu ciągłego o liczbie przęseł n>5.
Podobny do pokazanego sposób obliczania współczynnika dynamicznego obowiązuje w normie PN-EN.

Standardy Techniczne [4] przywołują zapisy normy PN-EN [3] dotyczące obliczania współczynnika dynamicznego:
– w przypadku starannego utrzymania toru – wartość wg wzoru (1) z ograniczeniem „górnym” równym 1,67, przy czym L_φ – rozpiętość teoretyczna przęsła swobodnie podpartego lub średnia rozpiętość przęsła układu ciągłego,
– w przypadku typowego utrzymania toru – wartość wg wzoru:

$$\varphi = \frac{2{,}16}{\sqrt{L_\varphi} - 0{,}2} + 0{,}73 \le 2{,}00\,. \tag{2}$$

3. STANY GRANICZNE UŻYTKOWALNOŚCI

W chińskiej normie projektowania obiektów inżynierskich w ciągu linii dużych prędkości zamieszczono ograniczenia dotyczące wybranych cech użytko-

wych przęseł. Są to m.in.: ugięcie przęsła, kąt obrotu przęsła w miejscu jego oparcia na łożysku, częstotliwość drgań własnych [5].

W przypadku ugięć oraz kątów obrotu przęsła w miejscu oparcia przęsła na łożysku w normie chińskiej podano graniczne wartości dla dwutorowych, swobodnie podpartych, betonowych przęseł skrzynkowych o rozpiętości teoretycznej do 96 m [5]. Przemieszczenia te należy obliczać od obciążenia „standardowego" ZR bez współczynnika dynamicznego, niezależnie od prędkości projektowej na danej linii.

Standardy Techniczne [4] nakazują obliczanie przemieszczeń pionowych od taboru przewidzianego do eksploatacji oraz

– od obciążenia LM71 lub SW/0 wg [3], w przypadku obiektów w ciągu linii o prędkości projektowej do 200 km/h,

– od obciążenia HSLM wg [3], w przypadku obiektów w ciągu linii o prędkości projektowej z powyżej 200 km/h, do 250 km/h.

W każdym z przypadków należy stosować obciążenia zmienne bez współczynników dynamicznych, mnożników klasy obciążeń oraz jakichkolwiek współczynników obciążeń. Wyjątek stanowią obciążenia pionowe przy prędkości pociągów równej 250 km/h, kiedy, w odniesieniu do rzeczywistych pociągów, należy stosować współczynnik dynamiczny $1+\rho$ według załącznika C normy [3].

Na obliczone w opisany wyżej sposób ugięcia przęseł normy nakładają ograniczenia. W tablicy 1 zestawiono wartości maksymalnych ugięć przęseł wg normy chińskiej [5] i obowiązującej w normie PN-EN [6]. Norma [6] nakazuje obliczać ugięcia od sklasyfikowanego obciążenia ze współczynnikiem $\gamma_f=1{,}00$.

Tablica 1. Maksymalne całkowite ugięcie wywołane obciążeniem zmiennym

Norma chińska				PN-EN
Prędkość projektowa [km/h]	Rozpiętość przęsła [m]			
	L≤40	40<L≤80	80<L	
250	L/1400	L/1400	L/1000	L/600
350	L/1600	L/1900	L/1500	

Jeśli przyjąć, że obciążenie ZK stanowi 80% obciążenia LM71, to granicznej sztywności konstrukcji opisanej ugięciem L/600 wg Standardów Technicznych [4] odpowiada graniczna sztywność opisana ugięciem L/750 wg normy chińskiej. Tablica 1 pokazuje, że norma chińska wymaga konstrukcji przęseł sztywniejszych przy zginaniu w porównaniu normą polską.

W przypadku kątów obrotu w miejscu oparcia przęsła na łożysku norma chińska różnicuje wymagania w zależności od konstrukcje nawierzchni: tor na podsypce tłuczniowej i tor na konstrukcji. Maksymalne kąty obrotu zależą ponadto od długości przewieszenia przęsła poza punkt podparcia [5]. Według

Standardów Technicznych [4] wartość maksymalnego kąta obrotu zależy od prędkości projektowej i od liczby torów na obiekcie mostowym.

Na obliczone wartości kątów obrotu przęseł w punkach podparcia normy nakładają ograniczenia. W tablicy 2 zestawiono wartości maksymalnych kątów obrotu przęseł wg normy chińskiej [5] i Standardów Technicznych [4]. Należy zauważyć, że norma PN-EN [3] ogranicza kąty obrotu w sposób pośredni, poprzez ograniczenie naprężeń w szynie toru ułożonego na obiekcie mostowym. W tej sytuacji kontrola kąta obrotu wymaga utworzenia modelu obliczeniowego przęsła wraz z nawierzchnią według zasad podanych w normie PN-EN [3].

Tablica 2. Maksymalne kąty obrotu przęseł (patrz rys. 3)

Lokalizacja	Tor	$tg(\alpha)$ lub $tg(\alpha_1)+tg(\alpha_2)$	
		Norma chińska	Standardy Techniczne
Nad podporami skrajnymi	na podsypce tłuczniowej	0,0020	$0{,}0065^{a}$ $0{,}0035^{b}$ $0{,}0020^{c}$
	na konstrukcji	$0{,}0015^{*}$ $0{,}0010^{**}$	
Nad filarami	na podsypce tłuczniowej	0,0040	$0{,}0100^{a}$ $0{,}0050^{b}$ $0{,}0040^{c}$
	na konstrukcji	$0{,}0030^{*}$ $0{,}0020^{**}$	

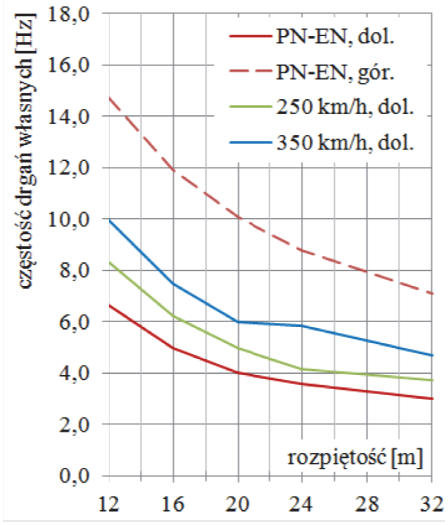
Objaśnienia do tablicy 2:
α, α_1, α_2 –kąty obrotu przęsła w miejscu oparcia na łożysku wg rys. 3,
* – jeśli przewieszenie „w" przęsła poza punkt podparcia: $w \leq 0{,}55$ m,
** – jeśli przewieszenie „w" przęsła poza punkt podparcia: $0{,}55 < w \leq 0{,}75$ m,
^{a} – jeśli prędkość projektowa $v \leq 200$ km/h, przęsło jednotorowe,
^{b} – jeśli prędkość projektowa $v \leq 200$ km/h, przęsło dwutorowe,
^{c} – jeśli prędkość projektowa $200 < v \leq 250$ km/h.

Rys. 3. Kąty obrotu przęseł w miejscu oparcia na łożysku

Zestawienie w tablicy 2 pokazuje, że wymagania stawiane w Standardach Technicznych [4] są „ostrzejsze" w porównaniu z norma chińską. Wartości maksymalne dla toru na podsypce tłuczniowej, dla prędkości projektowej 250 km/h są w obu normach jednakowe, ale w Standardach Technicznych ograniczenie dotyczy efektów działania obciążenia większego o 25% w porównaniu z normą chińską. Według Standardów Technicznych [4] maksymalne dozwolone kąty obrotu nie zależą od długości przewieszenia przęsła poza punkt podparcia.

Norma chińska, podobnie jak PN-EN [3], podaje zakresy częstości drgań własnych przęseł (n_0) w funkcji ich rozpiętości obliczeniowej (L_φ), które zwal-

niają z obowiązku przeprowadzenia analizy dynamicznej. W przypadku normy chińskiej podano wartości częstości będące ograniczeniem dolnym, w zakresie rozpiętości 12÷32 m [5]. W przypadku przęseł o rozpiętości spoza tego przedziału wymagana jest analiza dynamiczna. Norma PN-EN [3] podaje zarówno ograniczenie dolne, które wynika z zagrożenia efektami drgań i zjawiskiem rezonansu podczas przejazdu taboru jak i ograniczenie górne, które wynika z zagrożenia dynamicznymi efektami związanymi z nierównościami toru. Standardy Techniczne [4] nakazują przeprowadzenie analizy dynamicznej obiektów mostowych projektowanych dla prędkości v>200 km/h.



Rys. 4. Graniczne wartości częstości drgań własnych w funkcji rozpiętości przęsła (dol. – dolna, gór. – górna)

Na rys. 4 graniczne wartości częstości drgań własnych z normy chińskiej (dla prędkości 250 i 350 km/h) zestawiono z wartościami podanymi w normie PN-EN [3] w zakresie rozpiętości 12÷32 m. Widać, że w zakresie rozpiętości analizowanych w normie chińskiej dolne ograniczenie zarówno dla prędkości 250 jak i 350 km/h jest „ostrzejsze" niż w przypadku normy PN-EN [3] – danej rozpiętości odpowiada większa wartość minimalna. Jest tak bowiem wartości w normie europejskiej przyjęto na podstawie wyników badań prowadzonych dla prędkości przejazdu równych oraz mniejszych od 250 km/h [5]. Zalecenia w normie chińskiej opracowano na podstawie badań pod ruchem z prędkościami w zakresie 250÷350 km/h.

W normie chińskiej zawarto także zalecenia dotyczące maksymalnych wartości przyspieszenia pionowego przęseł. Są one zróżnicowane w zależności od konstrukcje nawierzchni: tor na podsypce tłuczniowej i tor na konstrukcji [5]. W Standardach Technicznych [4] sprawdzenie przyspieszeń wymagane jest w przypadku prędkości projektowej 250 km/h. Wartości maksymalne podane w obu wymienionych źródłach oraz w normie PN-EN [6] podano w tablicy 3.

Zestawienie w tablicy 3 pokazuje, że w normie chińskiej i w normie PN-EN [6] przyjęto jednakowe wartość maksymalnego przyspieszenia pionowego przęsła. W Standardach Technicznych [4] maksymalna wartość przyspieszenia pionowego jest istotnie ograniczona ze względu na charakterystykę techniczną taboru.

Tablica 3. Maksymalne wartości przyspieszeń pionowych przęseł

Tor	Przyspieszenie pionowe [m/s^2]		
	Norma chińska	Standardy Techniczne	PN-EN [6]
Na podsypce tłuczniowej	3,5*	3,5^{a} lub 2,0^{b}	3,5*
Na konstrukcji	5,0**		5,0**

Objaśnienia do tablicy 3:
* – ze względu na rozluźnienie podsypki,
** – ze względu na zapewnienie kontaktu koła z szyną,
^{a} – ze względu na stabilność podsypki tłuczniowej,
^{b} – ze względu na akceptowalne przyspieszenie pojazdów szynowych.

4. SYSTEM OBIEKTÓW MOSTOWYCH

W konsekwencji rządowego programu badawczego opracowano system obiektów mostowych do obsługi linii dużych prędkości. System obiektów mostowych o przęsłach małej rozpiętości tworzą ustroje swobodnie podparte o rozpiętości teoretycznej przęsła 24 i 32 m, ustroje w układzie ciągłym z dźwigarami o stałej wysokości i rozpiętości teoretycznej przęseł: 2×24, 3×24, 2×32, 3×32 i 2×40 m, a także ustroje w układzie ciągłym z dźwigarami o zmiennej wysokości i rozpiętości teoretycznej przęseł: 32+48+32, 40+56+40, 40+64+40, 48+80+48, 60+100+60 m. Są to ustroje z betonu sprężonego klasy C45/55, o przekroju skrzynkowym jedno- i dwukomorowym. Na rys. 5 pokazano przekroje poprzeczne przęseł swobodnie podpartych, a na rys. 6 – przekroje poprzeczne przęseł układu ciągłego, nad podporą pośrednią (a) i w środku rozpiętości (b).

Wymiary przekroju poprzecznego zależą od prędkości projektowej oraz od tego czy tor ułożony jest na podsypce tłuczniowej, czy bezpośrednio na konstrukcji przęsła. W przypadku przęseł swobodnie podpartych:

- szerokość pomostu (T) waha się w zakresie 11,6÷13,4 m,
- szerokość dolnej płyty skrzynki (B) równa jest około 5,5 m w przypadku skrzynki jednokomorowej i 6,5 m w przypadku skrzynki dwukomorowej,
- wysokość dźwigara skrzynkowego waha się w zakresie 2,7÷3,1 m
- grubość ścianek skrzynek waha się w zakresie 0,28÷0,48 m w przypadku skrzynki jednokomorowej i jest równa 0,24 m w przypadku skrzynki dwukomorowej.

W przypadku przęseł w układach ciągłych:

- szerokość pomostu waha się w zakresie 13,0÷13,4 m w przypadku stałej wysokości dźwigara i 12,0÷12,2 m w przypadku zmiennej wysokości dźwigara,

- szerokość dolnej płyty skrzynki waha się w zakresie 5,68÷6,06 m w przypadku stałej wysokości dźwigara i 5,56÷7,90 m w przypadku zmiennej wysokości dźwigara,
- wysokość dźwigara skrzynkowego waha się w zakresie 2,7÷3,1 m w przypadku stałej wysokości dźwigara (zależnie od rozpiętości przęseł) i 2,8÷7,8 m w przypadku zmiennej wysokości dźwigara,
- grubość ścianek skrzynek waha się w zakresie: płyta górna – 0,25÷0,45 m, płyta dolna – 0,50÷1,10 m, ściany boczne – 0,30÷0,90 m.

5. PODSUMOWANIE

W referacie zaprezentowano wybrane wytyczne projektowanie obiektów mostowych w ciągu linii kolejowych dużych zawarte w normie wprowadzonej w 2007 w Chinach. Norma linii kolejowych obsługujących ruch z prędkością 250 i 350 km/h. Wskutek przyjęcia koncepcji budowy odrębnej sieci linii dużych prędkości linii wartości obciążeń zalecanego modelu LM71 uległy redukcji odpowiadającej współczynnikowi klasyfikacyjnemu α=0,80. Metoda wyznaczania współczynnika dynamicznego nie różni się od podanej w normie PN-EN [3].

Stany graniczne użytkowania dotyczące przęseł przyjęte w normie chińskiej są analogiczne jak w normie PN-EN. Stan graniczny dotyczący kąta obrotu przęsła w punkcie podparcia wyrażono w mierze kątowej, a nie jak w normie PN-EN w odniesieniu do naprężenia w szynie. Przyjęto także inną niż w normie PN-EN dolną granicę zakresu częstości drgań własnych przęsła, dla którego niewymagana jest dokładna analiza dynamiczna. Dla obu prędkości (250 i 350 km/h) dolna granica zakresy przesunięta jest na wykresie górę co oznacza zawężenie zakresu domyślnie „bezpiecznych" częstości drgań własnych dla danej rozpiętości przęsła.

System obiektów mostowych małej rozpiętości (tj. do 100 m) przeznaczonych wg zaleceń chińskich do obsługi ruchu na liniach dużych prędkości obejmuje sprężone przęsła o przekroju skrzynkowych jedno- i dwukomorowym. Ich rozpiętość wynosi 24 i 32 m w schemacie swobodnie podpartym oraz waha się w zakresie 24÷100 m w schematach ciągłych dwu- i trójprzęsłowych. Schematy dwuprzęsłowe obejmują wyłącznie przęsła jednakowej rozpiętości i stałej wysokości dźwigara, schematy trójprzęsłowe – wyłącznie przęsła o niejednakowej rozpiętości i zmiennej wysokości dźwigara.

LITERATURA

1. Bin Yan, Gong-Lian Dai, Nan Hu, *Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China*, Engineering Structures 100 (2015), 707–717.

2. Nan Hu, Gong-Lian Dai, Bin Yan, Ke Liu, *Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China*, Engineering Structures 74 (2014), 233–241.
3. PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów, PKN, Warszawa 2007.
4. Standardy Techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem), t. III: Kolejowe obiekty inżynierskie, Wersja 1.1, PKP PLK SA, CNTK, Warszawa 2009.
5. Zhou, Y.E., Hu, S., Ke, Z., Niu, B., *Consideration for development of high speed rail bridge design standards*, Proceedings of the AREMA 2012 Annual Conference & Exposition, Chicago, September 16-19, 2012.
6. PN-EN 1990:2004/A1. Zmiana do normy: PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.

BUILDING HIGH SPEED RAIL IN CHINA – SMALL SPAN BRIDGE STRUCTURES

Summary

For about 25 years China has been developing high speed railway transport, so called high speed rail (HSR). The idea of building completely new tracks and stations has been adopted. In 2007 a new standard for design of HSR was introduced in China. The standard is, in general, compliant with PN-EN standard rules for bridge design. However it applies to bridge carrying railway traffic at 250 km/h and 350 km/h velocity. Serviceability limit states are expressed as in the PN-EN standard. There are also same differences, for instance: load values of load model LM71. A system of small span bridge structures has been worked out for the HSR in China. It is based on prestressed concrete spans, mainly simply supported. Requirements for bridge structures in China are coincident with those included in the PN-EN standards.