



HENRYK ZOBEL¹⁾
MAGDALENA KRUK²⁾
DARIUSZ SOBALA³⁾

ŁOŻYSKOWANIE MOSTÓW W SKOSIE

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono sposoby określania temperatury i przemieszczeń termicznych konstrukcji mostu oraz temperatury montażu łożysk. Wyznaczono rozkłady przemieszczeń termicznych w mostach w skosie przy różnych systemach ich łożyskowania. Korzystając z programu FETAB obliczono rozkłady temperatury w przekrojach poprzecznych mostów dla najcieplejszego i najzimniejszego okresu roku. Stosując system ANSYS obliczono rozkłady przemieszczeń termicznych w wybranych mostach trójprzęsłowych. Analizowano wpływ wartości kąta skosu na rozkład przemieszczeń termicznych przy różnych sposobach łożyskowania mostów w skosie. Oceniano efektywność stosowania różnych sposobów łożyskowania mostów w skosie.

1. WSTĘP

Podstawowym zadaniem łożysk mostowych jest podpieranie ustroju nośnego i przenoszenie obciążeń, zarówno pionowych jak i poziomych, na podpory. Ponadto łożyska zapewniają swobodę przemieszczeń liniowych (przesuwów) i kątowych (obrotów) konstrukcji nośnej względem podpor wywołanych obciążeniami i oddziaływaniami,

¹⁾ dr hab. inż. - profesor Politechniki Warszawskiej, Instytut Dróg i Mostów

²⁾ mgr inż. - Instytut Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich Politechniki Warszawskiej

³⁾ dr inż. - Katedra Mostów Politechniki Rzeszowskiej

a w tym zmianami temperatury będącymi funkcją warunków geograficzno-topograficzno-meteorologicznych, w jakich pracuje konstrukcja mostowa. Jeśli przewidywane wartości przemieszczeń są za małe, to wtedy następuje uszkodzenie konstrukcji mostu. Z kolei, gdy obliczone odkształcenia są zbyt duże, to dobiera się nieodpowiednie łożyska i w konsekwencji podnosi się niepotrzebnie koszty budowy mostu.

Sposób łożyskowania w mostach prostych jest znany, natomiast w mostach zakrzywionych został opisany w osobnym artykule tego kwartalnika. Poniżej przedstawiono wyniki analizy termiczno-wytrzymałościowej dokonanej w celu określenia rozkładów przemieszczeń termicznych przy różnych systemach łożyskowania mostów w skosie. Przy wykorzystaniu metod numerycznych analizowano wpływ wartości kąta skosu na rozkład przemieszczeń termicznych w mostach w skosie przy różnych sposobach podparcia mostów. Obliczenia przeprowadzono w przypadku mostów trójprzęsłowych: betonowych skrzynkowych, stalowych dwudźwigarowych z płytą ortotropową i zespolonych czterodźwigarowych stosując metodę elementów skończonych i metodę elementów brzegowych.

2. TEMPERATURA KONSTRUKCJI MOSTU

Zjawiska termiczne w mostach zachodzą w dwóch nakładających się na siebie cyklach: dobowym i rocznym. W cyklu dobowym zaobserwowano, że maksymalne promieniowanie słoneczne jest najczęściej o godz. 12⁰⁰ czasu lokalnego, a minimalna temperatura powietrza na godzinę przed wschodem słońca. Natomiast w cyklu rocznym, który zmienia się wraz z położeniem Ziemi względem Słońca, maksymalne promieniowanie słoneczne na płaszczyznę poziomą występuje podczas najdłuższego dnia w roku, a najwyższa temperatura powietrza jest osiągana kilka tygodni później. Oba cykle, a szczególnie dobowy, są zakłócanie obecnością chmur, opadami, cyrkulacją zimnego i ciepłego powietrza, zanieczyszczeniem atmosfery, wysokością nad poziomem morza, lokalizacją mostu itp.

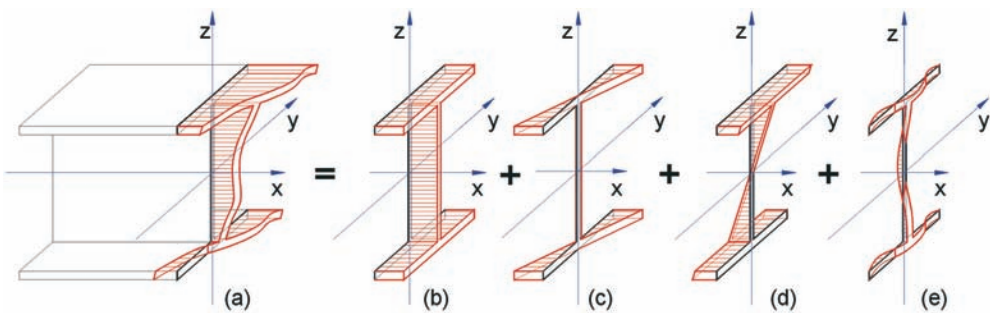
Na rozkład temperatury w moście wpływa wiele czynników, które można pogrupować w następujący sposób:

1) czynniki meteorologiczno-klimatyczne takie jak:

- dobowa i roczna zmienność temperatur,
- prędkość wiatru w otoczeniu mostu i na jego powierzchniach,
- promieniowanie: bezpośrednie promieniowanie słoneczne, dyfuzyjne promieniowanie słoneczne, promieniowanie ciepłe atmosfery i otoczenia, promieniowanie słoneczne odbite od konstrukcji, reemisja przez konstrukcję do atmosfery,

- 2) czynniki określające lokalizację i orientację geograficzną konstrukcji tj. szerokość geograficzna, azymut, deklinacja, położenie słońca względem obiektu, położenie nad poziomem morza, położenie względem stron świata, topografia terenu,
- 3) stopień zanieczyszczenia powietrza i stopień zachmurzenia,
- 4) kształt konstrukcji i charakter geometryczny przekroju poprzecznego (kształt przekroju, liczba dźwigarów, długość wsporników, kąt pochylenia środników itp.),
- 5) właściwości materiałów takie jak: gęstość, ciepło właściwe, współczynnik przewodności cieplnej, współczynnik przejmowania ciepła, współczynniki promieniowania pochłanianego i odbijanego.

Wykresy rzeczywistych rozkładów temperatur w konstrukcji mostowej (po wysokości przekroju) mają charakter krzywoliniowy. Każdy taki rozkład można rozłożyć na cztery składowe: równomierną, dwie liniowe i krzywoliniową. Równomierna składowa wpływa na wydłużenie mostu, składowe liniowe wywołują zginanie i obroty przekrojów w dwóch płaszczyznach, a składowa krzywoliniowa wywołuje samorównoważące się naprężenia własne (rys. 1). Generalnie przyjmuje się, że na długości mostu charakter rozkładu temperatury na wysokości mostu nie ulega zmianie. Twierdzenie to jest prawdziwe w przypadku mostów prostych, ale nie koniecznie mostów w skosie i zakrzywionych w planie.



Rys.1. Rzeczywisty rozkład temperatury w elemencie konstrukcyjnym i jego składowe
 a) rzeczywisty rozkład temperatury, b) składowa równomierna,
 c) składowa liniowa w kierunku osi z,
 d) składowa liniowa w kierunku osi y,
 e) składowa nieliniowa

Fig.1. Diagrammatic representation of constituent components of a temperature profile
 a) a real distribution of temperature, b) a uniform temperature component,
 c) a linearly varying temperature difference component about the z-z axis,
 d) a linearly varying temperature difference component about the y-y axis
 e) a non-linear temperature difference component

Umownie zakłada się, że cykl roczny wpływa na wydłużenia i skrócenia elementów konstrukcji mostu (składowa równomierna - rys. 1b), natomiast dobowe zmiany meteorologiczne powodują zmiany rozkładu temperatury na wysokości, szerokości i długości mostu (składowe liniowe - rys. 1c i 1d).

Badania dowodzą również, że rozkład temperatury na wysokości przekroju poprzecznego ma nieznaczny wpływ na wielkość przemieszczeń konstrukcji wzdłuż osi, ale silnie wpływa na wielkości ugięć i obrotów dźwigarów oraz na rozkład naprężeń w całej konstrukcji.

W ciągu ostatnich 30 - 40 lat przeprowadzono wiele badań, w wyniku których określono charakter rozkładów temperatury w różnych rodzajach konstrukcji mostowych. Opracowano wzory, mniej lub bardziej wiarygodne, które pozwalają powiązać zmiany temperatury powietrza ze zmianami konstrukcji mostowych.

Z punktu widzenia problemu łożyskowania mostów za najistotniejsze należy uznać prace Mary Emerson [1 - 5], która w latach 70-tych XX wieku wprowadziła pojęcie efektywnej temperatury mostu. Przykładowo dla mostu zespolonego efektywna temperatura mostu wyraża się wzorem (1):

$$T = \frac{A_b \alpha_b \Delta T_b + n A_s \alpha_s \Delta T_s}{A_b \alpha_b + n A_s \alpha_s} \quad (1)$$

gdzie:

A_s, A_b – pole przekroju odpowiednio stalowego i betonowego,

E_s, E_b – moduł Younga odpowiednio stali i betonu,

α_s, α_b – współczynniki rozszerzalności termicznej stali i betonu,

$\Delta T_s, \Delta T_b$ – różnice temperatur w elementach stalowych i betonowych,

$n = E_s / E_b$

Wzór ten określa średnią temperaturę konstrukcji mostowej bazując na średniej minimalnej $T_{sr, \min}$ i średniej maksymalnej $T_{sr, \max}$ temperaturze konstrukcji mostowej w ramach jednego cyklu dobowego. Wartość ta jest korygowana z uwagi na położenie mostu nad poziomem morza, rodzaj nawierzchni, wielkość promieniowania słonecznego. To podejście traktuje konstrukcję nośną jako pręt. Wzór na efektywną temperaturę mostu określa temperaturę wzdłuż podłużnej osi mostu i nie uwzględnia rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym. Jest on wystarczająco dobry na potrzeby określania odkształceń termicznych mostów prostych o niezbyt dużej wysokości konstrukcyjnej, ale zawodzi przy analizie mostów w skosie i zakrzywionych w planie.

Średnia minimalna temperatura konstrukcji mostowej $T_{sr, \min}$ obliczana jest jako średnia arytmetyczna najniższej temperatury otoczenia z nocy $T_{l, noc}$ i najwyższej temperatury otoczenia z dnia poprzedzającego $T_{h, dzień}$ dla trzech podstawowych rodzajów

mostów tzn. zespolonych (wzór 2), betonowych (wzór 3) i stalowych (wzór 4).

$$T_{\dot{s}r, \min} = \frac{1}{2} \cdot (T_{h, \text{dzień}} + T_{l, \text{noc}}) \cdot 1,13 - 2,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$T_{\dot{s}r, \min} = \frac{1}{2} \cdot (T_{h, \text{dzień}} + T_{l, \text{noc}}) \cdot 1,14 + 0,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$T_{\dot{s}r, \min} = \frac{1}{2} \cdot (T_{h, \text{dzień}} + T_{l, \text{noc}}) \cdot 1,02 + 0,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

Natomiast średnią maksymalną temperaturę konstrukcji mostowej $T_{\dot{s}r, \max}$ odpowiednio dla mostów zespolonych, betonowych i stalowych można wyznaczyć odpowiednio ze wzorów (5), (6) i (7).

$$T_{\dot{s}r, \max} = T_{\dot{s}r, \min} + 12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$T_{\dot{s}r, \max} = T_{\dot{s}r, \min} + 6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$T_{\dot{s}r, \max} = T_{\dot{s}r, \min} + 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

Podane powyżej dwa zestawy wzorów mają raczej konserwatywny charakter, ponieważ powstały przy założeniu, że największa różnica temperatur i najwyższa temperatura występują tego samego dnia, a tak praktycznie nie zdarza się.

Inne podejście zaprezentowali w swoich pracach Charles W. Roeder i Shashi Moorty-Kuppa [6 - 12]. Analizując pomierzone temperatury otoczenia z ostatnich 60 lat w 1273 stacjach meteorologicznych w USA, wyznaczyli stosując analizę statystyczną średnie, dzienne maksymalne i minimalne temperatury otoczenia. Następnie obliczyli średnią maksymalną i średnią minimalną temperaturę mostu na podstawie odpowiednich średnich, dziennych temperatur z czterech kolejnych dni korygowanych przez współczynniki uwzględniające porę roku, zachmurzenie, opady atmosferyczne, prędkość wiatru i wysokość położenia nad poziomem morza. Przykładowo, średnia maksymalna temperatura mostu zespolonego $T_{\dot{s}r, \max}$ i średnia minimalna temperatura mostu zespolonego $T_{\dot{s}r, \min}$ wyrażają się odpowiednio wzorami (8) i (9).

$$T_{\dot{s}r, \max, \text{most}} = 0,25 \cdot (T_{\max, \text{ot}1} + T_{\max, \text{ot}2} + T_{\max, \text{ot}3} + T_{\max, \text{ot}4}) \cdot 1,015 + 3,611 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$T_{\dot{s}r, \min, \text{most}} = 0,25 \cdot (T_{\min, \text{ot}1} + T_{\min, \text{ot}2} + T_{\min, \text{ot}3} + T_{\min, \text{ot}4}) \cdot 1,096 + 5,033 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Roeder i Moorty podali również liniową zależność pomiędzy maksymalną różnicą temperatur otoczenia ΔT_{ot} i maksymalną różnicą średniej (efektywnej) temperatury mostu ΔT_{most} . Dla mostu zespolonego zależność ta wyraża się wzorem (10).

$$\Delta T_{most} = 1,0506 \cdot \Delta T_{ot} - 2,638 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

Obliczenia wykonano dla najczęściej spotykanych mostów zespolonych i betonowych, bez uwzględniania rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym. W rezultacie stworzono mapy minimalnych i maksymalnych średnich temperatur mostów zespolonych i betonowych w USA, ale bez podziału na rodzaje konstrukcji. Na ich podstawie zweryfikowano wzory do określania temperatur montażu i przewidywanych odkształceń termicznych różnego typu łożysk i urządzeń dylatacyjnych.

Jeszcze inne podejście zaproponował zespół z Uniwersytetu w Calgary w Kanadzie. Polega ono na analitycznym uwzględnieniu wpływu czynników meteorologiczno-klimatyczno-topograficznych na wielkość strumienia ciepła pochłanianego przez konstrukcję mostową, a w konsekwencji na rozkład temperatury w moście. Efektem tych badań był między innymi program FETAB [13] służący do dwuwymiarowej analizy termicznej mostów przy zastosowaniu metody elementów skończonych i metody elementów brzegowych.

W Polsce problemy zachowania się mostów pod wpływem obciążenia termicznego zostały także zauważone i w ostatnich latach stały się tematem wielu opracowań [14] - [19]. Polska norma obciążeń mostowych PN-85/S-10030 [20] w sposób niezadowalający opisuje omawiany problem. Dlatego w latach 1998-2003 były prowadzone prace nad stworzeniem nowych procedur projektowych dla Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz w ramach grantu KBN przez zespół pracowników Politechniki Warszawskiej, Politechniki Rzeszowskiej, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej i Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego [27].

W celu określenia charakterystyk termicznych powietrza i ustalenia temperatury konstrukcji mostowej zebrano i odpowiednio przeanalizowano wyniki pomiarów temperatury powietrza w okresie 30 lat (1971 - 2000) dla 60 lokalizacji w Polsce. W efekcie uzyskano maksymalne i minimalne temperatury roczne i dobowe, największe różnice dobowe temperatur oraz maksymalne i minimalne średnie temperatury dobowe. Wyznaczono je przy zastosowaniu tzw. filtru 4-dobowego. Wynikowe, ekstremalne temperatury mostów (sprowadzone do osi podłużnej mostu) zostały opracowane dla różnych typu mostu i lokalizacji w postaci map przydatnych w procesie projektowania konstrukcji mostowych. Weryfikacja tych obliczeń została przeprowadzona empirycznie na eksploatowanych obiektach (mierzone były temperatury elementów konstrukcji, odkształcenia termiczne mostów). Wykonywano również pomiary terenowe i symulacje komputerowe dotyczące określenia zależności między temperaturami otoczenia i rozkładem temperatur w konstrukcji mostowej [21].

Najważniejsze wnioski dotyczące rozkładu temperatury w konstrukcjach mostowych usytuowanych w Polsce przedstawiają się następująco:

- zmienność temperatury w różnych elementach konstrukcji mostowych ma, podobnie jak temperatura otoczenia, charakter sinusoidalny,
- kształt wykresu rozkładu temperatury na wysokości przekroju mostu zespolonego i betonowego jest krzywoliniowy; natomiast dla mostu stalowego można uznać ten rozkład za liniowy czy wręcz stały; dla stalowych mostów z pomostem ortotropowym rozkład temperatury ma charakter zmienny tylko na wysokości pomostu, a poniżej pomostu, w dźwigarach temperatura jest prawie stała o wartości zbliżonej do temperatury otoczenia,
- największa różnica temperatury występuje pomiędzy wierzchem i spodem konstrukcji; mniejsze różnice występują na szerokości i długości mostu,
- maksymalna temperatura na wierzchu pomostu występuje około godziny 14⁰⁰ GMT, a minimalna około godziny 4⁰⁰ GMT; w podobnych porach zmieniają się temperatury pozostałych elementów mostu, a niewielkie przesunięcia w czasie są spowodowane głównie grubością elementu i położeniem względem stron świata,
- największe różnice temperatury pomiędzy wierzchem i spodem konstrukcji występują w miesiącach od lutego do kwietnia oraz we wrześniu i w październiku,
- największe różnice temperatury pomiędzy wierzchem i spodem konstrukcji występują przy usytuowaniu mostu na osi SW/NE,
- zmiana prędkości wiatru w znacznym stopniu wpływa na wartości temperatury konstrukcji,
- różnica temperatury pomiędzy wierzchem i spodem konstrukcji maleje wraz ze wzrostem zachmurzenia,
- w przypadku mostów skrzynkowych wartość różnicy temperatury jest tym większa im skrzynka jest wyższa oraz im krótszy jest wspornik chodnika,
- w przypadku przekrojów skrzynkowych, przy tej samej długości wspornika, im większy jest kąt nachylenia środników, tym większa jest różnica temperatury pomiędzy wierzchem i spodem konstrukcji,
 - rodzaj nawierzchni pomostu ma duży wpływ na różnicę temperatury w płycie pomostu; maleje ona o $\frac{1}{3}$, jeżeli most jest pokryty śniegiem lub lodem; zastosowanie izolacji powoduje przyrost temperatury o ok. 25% w porównaniu z mostem bez izolacji; im większa jest grubość nawierzchni asfaltowej na moście, tym mniejsza jest różnica temperatury w płycie pomostu.

Wspomniane wyżej prace wynikały między innymi z konieczności dostosowania przepisów normatywnych z zakresu budownictwa do standardów obowiązujących w Unii Europejskiej. Do normy EN 1991-1-5 [22] opracowano tzw. Załącznik Krajowy.

W zakresie problemu łożyskowania mostów EN 1991-1-5 zawiera następujące postanowienia. Konstrukcje mostowe podzielono na 3 grupy:

- GRUPA 1 – stalowe dźwigary skrzynkowe, kratownicowe lub blachownicowe z pomostem stalowym,
- GRUPA 2 – stalowe dźwigary skrzynkowe, kratownicowe lub blachownicowe z pomostem betonowym,
- GRUPA 3 – betonowe dźwigary skrzynkowe, belkowe lub płytowe z pomostem betonowym.

Ponadto zdecydowano, że określenie rodzaju i wartości oddziaływań termicznych przeprowadzane jest osobno dla ustroju nośnego i osobno dla podpór.

Z punktu widzenia problemów łożyskowania najważniejszym zagadnieniem jest określanie składowej równomiernej rozkładu temperatury w przekroju poprzecznym ustroju nośnego mostu.

Procedura obliczeniowa obejmuje:

- określenie z wykresu normowego (rys. 2) efektywnych minimalnych i maksymalnych temperatur $T_{e, \max}$ i $T_{e, \min}$ mostu na podstawie znajomości, z Załącznika Krajowego, temperatury powietrza w miejscu lokalizacji mostu,
- obliczenie charakterystycznych maksymalnych zakresów zmian temperatury wywołujących skrócenie ($\Delta T_{N, skr}$) lub wydłużenie mostu ($\Delta T_{N, wyd}$):

$$\Delta T_{N, skr} = T_0 - T_{e, \min} \qquad \Delta T_{N, wyd} = T_{e, \max} - T_0 \qquad (11)$$

gdzie:

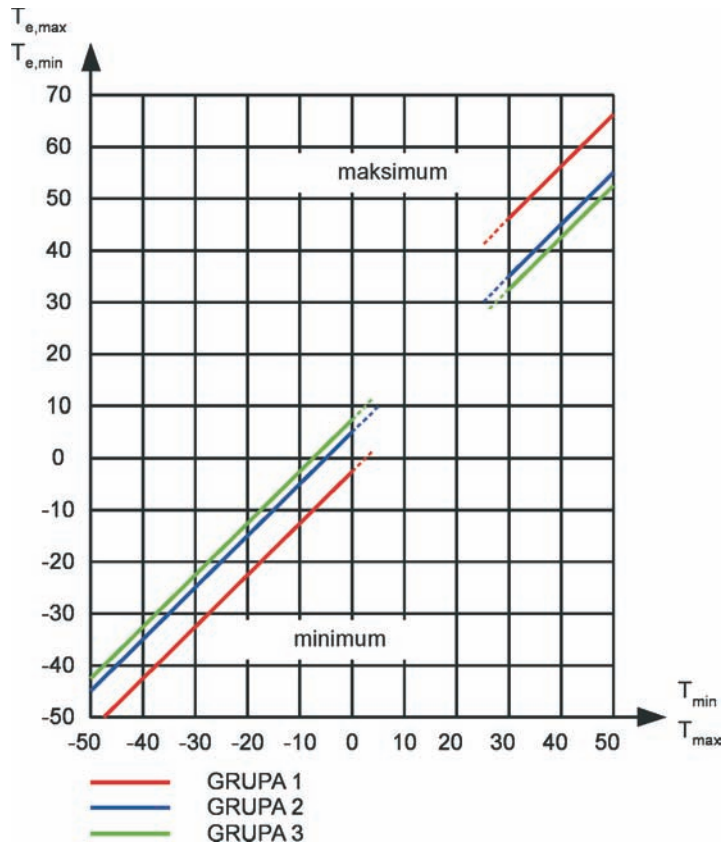
T_0 – efektywna temperatura mostu w czasie, gdy działają więzy konstrukcyjne uniemożliwiające swobodę odkształceń termicznych,

- całkowity zakres równomiernej składowej rozkładu temperatury określa się wg wzoru:

$$\Delta T_N = T_{e, \max} - T_{e, \min} \quad . \qquad (12)$$

Należy również dodać, że podstawowe wartości charakterystyczne oddziaływań termicznych są podane dla grubości nawierzchni równej 50 mm. Dla innych grubości nawierzchni wartości te powinny zostać pomnożone przez odpowiedni współczynnik. Na przykład dla nawierzchni o grubości 100 mm na pomoście betonowym dodatnia liniowa różnica temperatury (tzn. góra pomostu cieplejsza od spodu) jest mnożona przez 0,7 natomiast ujemna liniowa różnica temperatur (tzn. spód pomostu cieplejszy od góry) jest mnożona przez 1,0.

W Załączniku Krajowym do EN 1991-1-5 proponuje się korzystanie przy określaniu zakresu składowej równomiernej rozkładu temperatury w moście (rys. 1b) z map ekstremalnych temperatur konstrukcji mostów stalowych, zespolonych i betonowych (zamiast z wykresu z rys. 2.) Pozwoliłoby to w wygodny i bardziej dokładny sposób ustalać temperatury mostów przy określaniu wielkości przemieszczeń termicznych, a co za tym idzie i sposobu ich łożyskowania.



Rys.2. Związek między minimalną/maksymalną temperaturą powietrza (T_{min}/ T_{max}) i składową równomierną minimalnej/maksymalnej temperatury mostu ($T_{e,min}/ T_{e,max}$) wg EN 1991-1-5
 Fig.2 Correlation between minimum/maximum shade air temperature (T_{min}/ T_{max}) and minimum/maximum uniform bridge temperature component ($T_{e,min}/ T_{e,max}$)

UWAGA 1: Wartości na rys. 2 są oparte na dziennych różnicach temperatury równych 10 °C. Taki zakres uznaje się za prawidłowy dla większości państw członkowskich Unii Europejskiej
 UWAGA 2: Dla stalowych kratownic i blachownic wartości maksymalne określone dla grupy 1 można zredukować o 3 °C

3. TEMPERATURA MONTAŻU ŁOŻYSK

Określenie ekstremalnych wartości temperatury powietrza i konstrukcji nie jest wystarczające z punktu widzenia procesu instalacji łożysk na podporach. Do tego celu konieczne jest ustalenie wartości tzw. temperatury montażu.

Według normy polskiej PN-85/10030 [20] temperatura montażu opisująca chwilowy stan konstrukcji w danym dniu roku podaje stałą temperaturę zwarcia konstrukcji równą 10 °C. D. Sobala w pracy [21] zaproponował obniżenie tej wartości do 8 °C.

W pracach [6] - [12] S. Moorty i C.W. Roeder na podstawie analizy danych meteorologicznych z terenu USA przedstawili propozycje zasad określania tego parametru dla różnych typów łożysk.

Dla łożysk mechanicznych, a także innych, których działanie polega na przemieszczaniu się po powierzchniach pokrytych materiałami o małym współczynniku tarcia (np. PTFE), temperaturę montażu T_m określa się z następującego wzoru:

$$T_m = T_{\dot{s}r, \min} + 0,5 \cdot (T_{\dot{s}r, \max} - T_{\dot{s}r, \min}) , \quad (13)$$

gdzie:

$T_{\dot{s}r, \min}$ – średnia temperatura minimalna mostu,

$T_{\dot{s}r, \max}$ – średnia temperatura maksymalna mostu.

W przypadku łożysk odkształcalnych (np. elastomerowych) wzór (13) przyjmuje następującą postać:

$$T_m = T_{\dot{s}r, \min} + 0,65 \cdot (T_{\dot{s}r, \max} - T_{\dot{s}r, \min}) . \quad (14)$$

Analiza powyższych wzorów pokazuje, że temperatura montażu łożysk odkształcalnych jest wyższa o 15% niż w przypadku łożysk o konstrukcji nieodkształcalnej. Po przekroczeniu pewnej wartości siły lub przemieszczenia działającego na łożysko, możliwości przejścia przez łożysko przemieszczenia zostają wyczerpane i obciążenia oraz oddziaływania na most zaczynają wywoływać odkształcenia podpory.

Aby uniknąć takiej sytuacji C.W. Roeder [9] - [11] zaproponował uniesienie przęsła ponad łożysko, gdy temperatura montażu T_m przekroczy wartość:

$$T_{\dot{s}r, \min} + 0,9 \cdot (T_{\dot{s}r, \max} - T_{\dot{s}r, \min}) \quad (15)$$

lub gdy będzie mniejsza niż:

$$T_{\dot{s}r, \min} + 0,25 \cdot (T_{\dot{s}r, \max} - T_{\dot{s}r, \min}) . \quad (16)$$

Inne podejście zawiera norma europejska EN 1337 [23], która określa sposób obliczania wartości temperatury montażu w odniesieniu do łożysk mostowych. Według

jej części 11 przed przystąpieniem do ustawiania łożysk „należy określić przybliżoną temperaturę konstrukcji oraz, w szczególnych przypadkach, uwzględnić rozkład temperatury w różnych punktach konstrukcji, a także gdy to konieczne, uwzględnić to przy ustalaniu wartości wyprzedzenia”.

W załączniku A do części 11, pkt. A2 znajdują się następujące wyjaśnienia:

- średnią temperaturę konstrukcji można wyznaczyć, mierząc temperaturę powierzchni w odpowiednio dobranych punktach, wybierając je w zależności od kształtu przekroju poprzecznego oraz warunków topograficznych,
- jeżeli most przekracza różne ukształtowania topograficzne (łąd lub wodę) to zalecany jest podział mostu w kierunku podłużnym na różne odcinki ze średnią temperaturą konstrukcji mierzoną w każdym rozpatrywanym odcinku; ta średnia temperatura każdego odcinka może być następnie wykorzystana do obliczenia przemieszczenia każdego z odcinków,
- wybór punktów pomiaru temperatury, a następnie metody szacowania średniej temperatury w przypadku niektórych rodzajów mostów podano poniżej:

plyty – temperaturę należy mierzyć w środku rozpiętości przęsła na środku górnej i dolnej powierzchni płyty; średnia arytmetyczna tych dwóch wartości będzie wówczas średnią temperaturą płyty,

belki teowe – średnią temperaturę należy przyjmować jako średnią temperatury górnej i dolnej powierzchni w środku pomostu; średnią temperaturę belek należy przyjmować jako średnią temperatury powierzchni zewnętrznych obu zewnętrznych dźwigarów głównych w połowie wysokości ich środników; średnią temperaturę całej konstrukcji niosącej należy zatem szacować, uśredniając powyższe dwie wartości średniej temperatury, ważąc je w proporcji do pól przekrojów poprzecznych odpowiednich części,

dźwigary skrzynkowe – w tym przypadku temperatura powietrza wewnątrz skrzynki może być uważana za średnią temperaturę konstrukcji.

Z kolei w załączniku C do części 1 EN 1337, pkt. C1 opisano analityczny sposób obliczania temperatury montażu łożysk.

Oddziaływanie temperatury powietrza jest podstawowym oddziaływaniem na łożyska mostowe we wszystkich kombinacjach. Wartości charakterystyczne tych zmiennych oddziaływań można określić na podstawie średniej częstości występowania zarejestrowanej przez najbliższą stację meteorologiczną, na przykład w okresach dziennych lub rocznych w przypadku częstej kombinacji oraz w okresie 30-letnim, w przypadku rzadkiej kombinacji.

Różnica temperatury $T_{\max} - T_{\min}$ w konstrukcji jest zależna od najwyższej i najniższej lokalnej temperatury powietrza oraz od innych czynników klimatycznych. Skutek działania tych czynników nie wchodzi w zakres normy EN 1337. Temperatura T_{\max} oraz T_{\min} są wartościami średnimi odnoszonymi się do konstrukcji. W ich określaniu należy uwzględnić także przekrój poprzeczny i materiał konstrukcyjny, lokalne warunki klimatyczne oraz istniejące uregulowania krajowe.

Zmiana temperatury w konstrukcji wynosi:

$$\Delta T = |T_{\max} - T_{\min}| \quad (17)$$

Jeżeli znana jest dokładna temperatura konstrukcji podczas ustawiania to:

$$\Delta T_{rz} = 1,35 \cdot \Delta T \quad (18)$$

gdzie:

ΔT_{rz} – rzeczywista zmiana temperatury.

Jeżeli bardziej dokładne dane są niedostępne, to wartości te powinny być zwiększone bardziej lub mniej równomiernie po obu stronach cieplej i zimnej, w ten sposób, aby:

$$|T_{rz, \min} - T_{\min}| \geq |T_{rz, \max} - T_{\max}| \quad (19)$$

gdzie:

$T_{rz, \min}, T_{rz, \max}$ – „rzeczywiste” zmiany temperatury.

Jeśli temperatura konstrukcji podczas jej ustawiania jest z góry określona, to należy dołączyć dodatkową wartość ΔT^* (zgodnie z tabelicą 1) czyli:

$$T_{rz, \min}^* = T_{rz, \min} - \Delta T^* \quad (20)$$

$$T_{rz, \max}^* = T_{rz, \max} + \Delta T^* \quad (21)$$

gdzie:

$T_{rz, \min}^*, T_{rz, \max}^*$ – „hipotetyczne wartości graniczne temperatury”.

Tabela 1. Graniczne wartości temperatury wg załącznika C do [23]

Table 1. Limit temperatures according to appendix C [23]

Różnica temperatury w konstrukcji	„Rzeczywiste” wartości graniczne temperatury, gdy jest znana i uwzględniana dokładna temperatura konstrukcji podczas ustawiania	„Hipotetyczne” wartości graniczne temperatury, gdy dokładna temperatura konstrukcji podczas ustawiania jest określana z góry
$T_{\min} \dots T_{\max}$	$T_{rz, \min} \dots T_{rz, \max}$ $\Delta T_{rz} / \Delta T = 1,35$ (chyba, że postanowiono inaczej)	$T_{rz, \min}^* \dots T_{rz, \max}^*$ $T_{rz} - T_{rz}^* = \Delta T^*$ $\Delta T^* = 10\text{K}$ w przypadku betonu $\Delta T^* = 15\text{K}$ w przypadku stali i konstrukcji zespolonej

Jak nie trudno zauważyć podejście zaprezentowane w EN 1337 jest tylko częściowo zgodne z normą EN 1991-1-5 dotyczącą oddziaływań termicznych. Niewątpliwie konieczne będzie skoordynowanie obu norm zarówno w zakresie nazewnictwa jak i pod względem merytorycznym.

4. UWAGI OGÓLNE O PRZEMIESZCZENIACH TERMICZNYCH MOSTÓW

Niewątpliwie temperatura powietrza, i w konsekwencji efektywna temperatura mostu, jest najważniejszym parametrem wpływającym na przemieszczenia konstrukcji mostowej. Oprócz niej wśród innych czynników, wpływających na odkształcenia i przemieszczenia mostów, należy wymienić: rodzaj materiału konstrukcyjnego, wielkość temperatury wnętrza konstrukcji, schemat statyczny konstrukcji, sztywność podpór (w szczególności pośrednich), sposób połączenia podpór z ustrojem nośnym, orientację i rodzaj łożysk, rodzaj urządzeń dylatacyjnych, proporcje wymiarów mostu, rozstaw i sztywność stężeń poprzecznych, a także, we wczesnych okresach eksploatacji mostów betonowych i zespolonych, zmiany objętościowe betonu wywołane zmianami wilgotności oraz skurcz i pęcznienie betonu. W przypadku mostów w skosie i zakrzywionych w planie bardzo istotny wpływ na odkształcenia i przemieszczenia konstrukcji ma geometria mostu tzn. kąt skosu i kąt zakrzywienia.

Można zauważyć ogólny, choć dość trudny do dokładnego określenia, związek między temperaturą otoczenia a przemieszczeniami termicznymi mostu. Stwierdzono przesunięcie w czasie między zaistnieniem ekstremalnych wartości temperatury otoczenia i ekstremalnych przemieszczeń. Wynosi ono od kilkadziesiąt minut w przypadku mostów stalowych do kilku godzin w przypadku mostów betonowych. Ma to związek z bezwładnością cieplną różnego rodzaju materiałów konstrukcyjnych. Z kolei bezwładność cieplna w dużym stopniu zależy od wartości współczynnika przewodności cieplnej tworzywa konstrukcyjnego, a także jego zdolności do pochłaniania i emitowania różnych rodzajów promieniowania. Ponadto, przesunięcie w czasie zależy od ukształtowania geometrycznego konstrukcji mostu.

Przemieszczenia termiczne mostów można podzielić na dwa rodzaje: jeden, zależny od dziennych zmian temperatury otoczenia i drugi, zależny od sezonowych zmian temperatury otoczenia. Przemieszczenia drugiego rodzaju są większe niż pierwszego, ponieważ zakres rocznych zmian temperatury jest znacznie większy od dziennych zmian temperatury. O ile w przypadku konstrukcji już eksploatowanych nie ma to znaczenia (pod warunkiem, że zostały prawidłowo zaprojektowane i wykonane), o tyle istotne jest w trakcie montażu konstrukcji mostowej. Świadczą o tym rzadkie, ale zdarzające się przypadki spadnięcia z łożysk nie zabezpieczonych dźwigarów stalowych w trakcie ich montażu.

Obliczanie przemieszczeń termicznych konstrukcji mostowych jest banalne w przypadku mostów prostych. Ich wartość wzdłuż osi podłużnej mostu oblicza się za

pomocą wzoru (22), definiując wcześniej zakresy różnicy temperatury

$$\Delta L = \alpha_T \cdot L \cdot \Delta T \quad (22)$$

gdzie:

α_T – współczynnik rozszerzalności termicznej,

L – długość rozszerzającego się elementu,

ΔT – różnica temperatury między maksymalną i minimalną temperaturą mostu.

Generalnie ten wzór sprawdza się zarówno dla prostych mostów stalowych (w tym zespolonych), jak i betonowych bez względu na ich schemat statyczny, pod warunkiem, że dźwigary są niezbyt wysokie. W przypadku wysokich dźwigarów belkowych zaobserwowano jednak, że odkształcenia termiczne na wierzchu i spodzie mogą różnić się znacząco, co w efekcie powoduje obroty na ich końcach.

W mostach w skosie oprócz przemieszczeń wzdłuż osi podłużnej mostu pojawiają się także przemieszczenia poprzeczne. Problemem staje się właściwa orientacja łożysk. Znacznie większego znaczenia nabiera zagadnienie oporów tarcia w łożyskach i sztywność podpór pośrednich oraz dobór odpowiednich urządzeń dylatacyjnych.

Jak wiadomo konstrukcje mostowe pod wpływem czynników meteorologiczno-klimatyczno-topograficznych zmieniają swoją szerokość i wysokość. Przyjmując, że w tych kierunkach przemieszczenia termiczne można wyznaczyć ze wzoru (22) należy pamiętać, że różnica temperatury ΔT jest inna niż w kierunku podłużnym.

Istnieją podejrzenia, że niektóre awarie mostów, jak na przykład „zaklinowanie się” łożysk czy urządzeń dylatacyjnych, uszkodzenia płyty pomostu, zarysowania i pęknięcia podpór, uszkodzenia stężeń poprzecznych, przemieszczenia nasypów dojazdowych do mostu, nadzwyczajne odkształcenia montażowe itp. są spowodowane nieprzewidzianym oddziaływaniem ww czynników. Powstają wtedy odkształcenia i przemieszczenia termiczne o wartościach i kierunkach zmiennych w czasie i zależnych w dużej mierze od położenia Słońca.

Próbę uwzględnienia tych czynników podjął Roeder [9] proponując obliczanie przemieszczeń termicznych dla łożysk mechanicznych ze wzoru:

$$\Delta L = \pm \alpha_T \cdot L \cdot [0,5 \cdot (T_{sr, \max} - T_{sr, \min}) + 11,1] \quad (23)$$

gdzie:

α_T – współczynnik rozszerzalności termicznej,

L – rozpiętość teoretyczna przęsła, czyli odległość między łożyskiem stałym a łożyskiem ruchomym,

$T_{sr, \min}$ – średnia temperatura minimalna mostu,

$T_{sr, \max}$ – średnia temperatura maksymalna mostu.

Natomiast w przypadku łożysk odkształcalnych (np. elastomerowych) wzór (23) przyjmuje następującą postać:

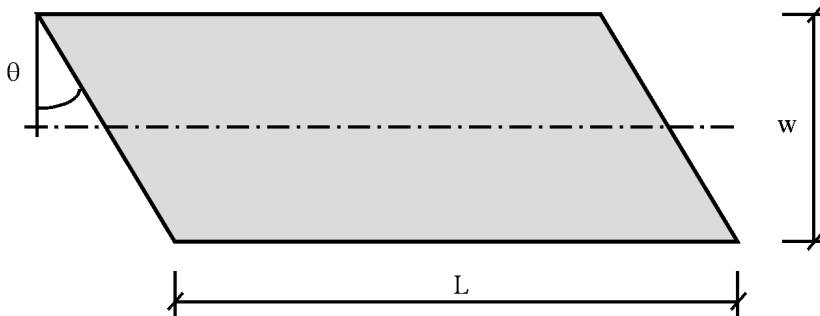
$$\Delta L = \pm \alpha_T \cdot L \cdot 0,65 \cdot (T_{sr, \max} - T_{sr, \min}) . \quad (24)$$

Z powyższego wzoru wynika, że zakres przemieszczeń termicznych dla łożysk odkształcalnych jest większy o 15% w porównaniu z łożyskami mechanicznymi.

Jak widać wzory stosowane do celów projektowych są stosunkowo proste. Jednak, aby móc dokładniej przeanalizować pracę mostu w skosie konieczne jest zastosowanie bardziej skomplikowanych metod zarówno w zakresie modelowania konstrukcji jak i modelowania obciążenia.

5. PRZEMIESZCZENIA TERMICZNE MOSTÓW W SKOSIE

Przemieszczenia termiczne mostów w skosie są bardziej skomplikowane niż mostów prostych. Większego znaczenia, oprócz termicznych przemieszczeń podłużnych, nabierają przemieszczenia poprzeczne. Schemat mostu w skosie wraz z oznaczeniem sposobu mierzenia kąta skosu pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Schemat mostu w skosie
Fig.3. Layout of skew bridge

Przemieszczenia termiczne w kierunku podłużnym określa się wg wzoru:

$$\Delta_{wzd} = \Delta \cdot \left(1 + \frac{w \cdot \operatorname{tg} \theta}{L} \right) , \quad (25)$$

gdzie:

w – szerokość pomostu,

L – długość całkowita pomostu,

θ – kąt skosu mostu określany jak na rysunku 3,

Δ – całkowite przemieszczenie termiczne obliczone wg wzoru (22).

Przemieszczenia termiczne w kierunku poprzecznym można obliczyć wg wzoru:

$$\Delta_{poprz} = w \cdot \frac{\Delta}{L} . \quad (26)$$

Rozkład i wielkość przemieszczeń termicznych w mostach w skosie zależy od wielu czynników. Jednoznaczne określenie wpływu tych czynników na wielkość odkształceń termicznych nie jest proste. Taką próbę podjęto na University of Washington, Seattle, USA. S. Moorty i C.W. Roeder przeprowadzili parametryczną symulację komputerową zachowania się pewnego często spotykanego typu zespolonej konstrukcji mostowej. Wyniki i wnioski tych badań przedstawiono w pracach [6] - [8] oraz w [10] i [12].

W [24] przeprowadzono analizę przemieszczeń termicznych mostów w skosie o konstrukcji betonowej o przekroju skrzynkowym, stalowej dwudźwigarowej z płytą ortotropową i zespolonej czterodźwigarowej pod wpływem oddziaływań termicznych zależnie od pory roku, dla zmieniających się kątów skosu, przy różnych schematach podparcia. Do badań przyjęto modele trójprzęsłowych mostów zorientowanych na linii wschód – zachód i zlokalizowanych w Warszawie. Założono rozpiętości przęsła 24 m – 30 m – 24 m oraz szerokość przęsła 9,2 m.

Modele obliczeniowe mostów betonowych spełniały następujące założenia:

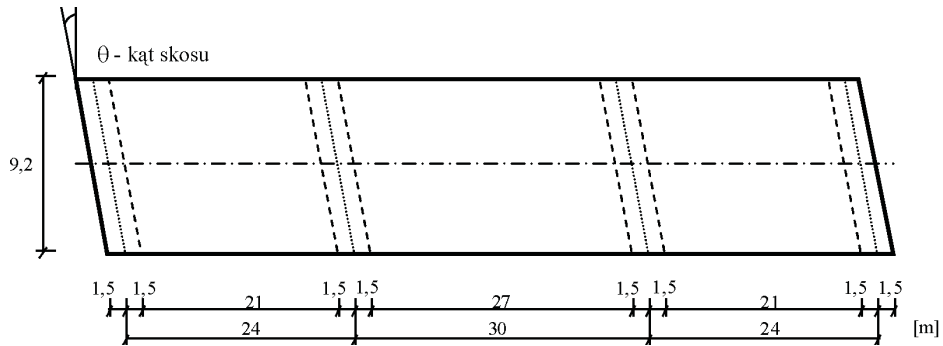
- mosty miały przekrój skrzynkowy (w strefach przypodporowych przekrój pełny),
- mosty były oparte na 8 łożyskach umieszczonych po dwa na czterech, nieskończenie sztywnych podporach; przyjęte łożyska umożliwiały, bądź ograniczały przemieszczenia liniowe wzdłuż osi podłużnej mostu i w kierunku doń prostopadłym,
- przyjęto 4 schematy podparcia mostu („a”, „b”, „c”, „d”),
- kąt skosu, mierzony od prostej prostopadłej do osi podłużnej mostu, przyjmował wartości: 0° (most prosty), 10°, 20°, 30° i 45° dla każdego systemu podparcia.

Na rysunku 4 przedstawiono rzut poziomy i schematyczny przekrój poprzeczny mostu, zaś na rysunku 5 schematy podparcia analizowanych mostów betonowych.

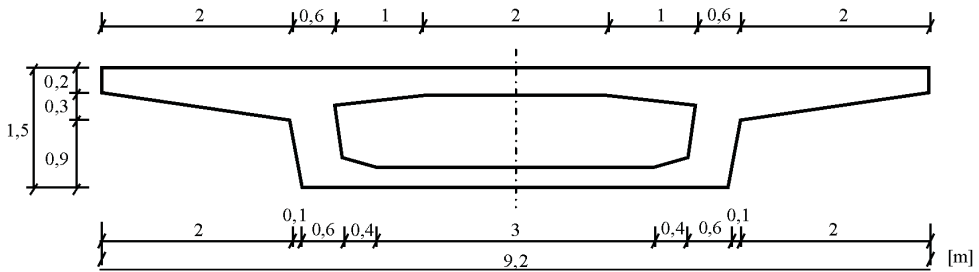
Z kolei modele obliczeniowe mostów stalowych z płytą ortotropową spełniały następujące założenia:

- w przekrojach nad podporami przyjęto stężenia w postaci pełnych przepon, natomiast wzdłuż całej długości mostu zastosowano poprzecznice (o wysokości równej $\frac{1}{3}$ wysokości dźwigara) rozstawione co 3 m,

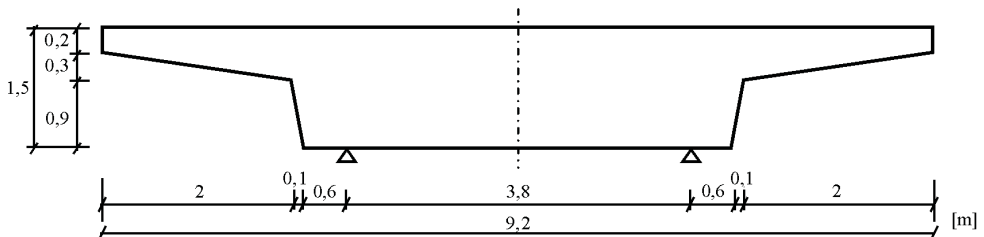
- mosty były oparte na 8 łożyskach umieszczonych po dwa w czterech, nieskończenie sztywnych podporach; umożliwiały one, bądź ograniczały przemieszczenia liniowe wzdłuż osi podłużnej mostu i w kierunku doń prostopadłym,
- przyjęto 4 schematy podparcia, takie jak dla mostów betonowych (rys. 5),
- kąt skosu przyjmował wartości: 0° , 10° , 20° , 30° i 45° dla każdego systemu podparcia.



Przekrój przęsłowy:

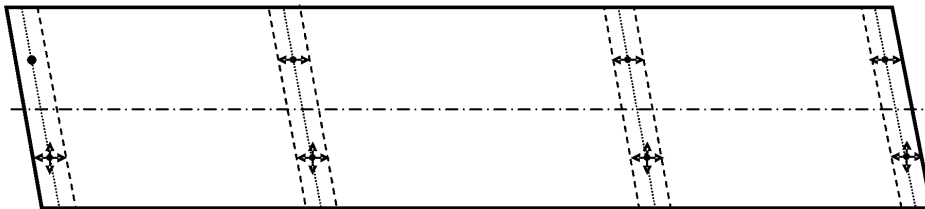


Przekrój podporowy:

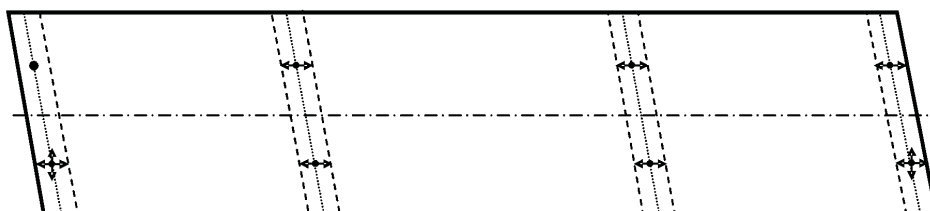


Rys.4. Rzut poziomy i schematyczny przekrój poprzeczny mostów betonowych
Fig.4. Layout and cross section of concrete skew bridge

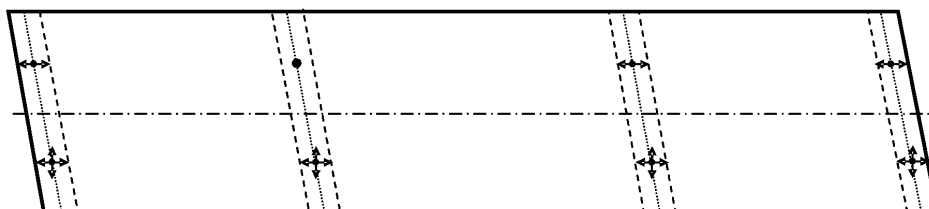
a) pierwszy schemat podparcia mostu betonowego w skosie



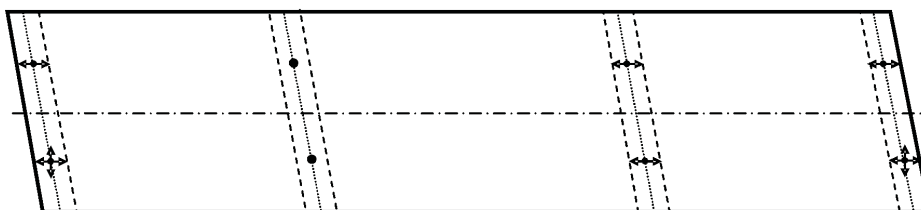
b) drugi schemat podparcia mostu betonowego w skosie



c) trzeci schemat podparcia mostu betonowego w skosie



d) czwarty schemat podparcia mostu betonowego w skosie:



Rys.5. Schematy podparcia mostów betonowych skrzynkowych w skosie

Fig.5. Bearing system for concrete, skew box girder bridge

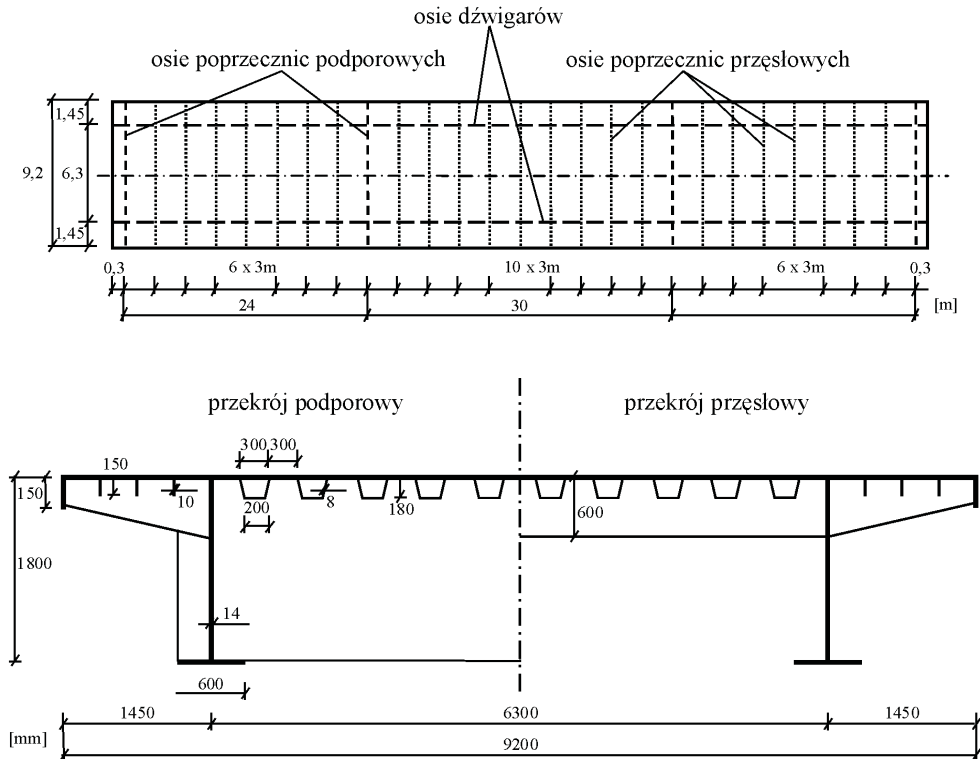
Oznaczenia łożysk:

- brak przemieszczeń liniowych we wszystkich kierunkach (obroty możliwe we wszystkich kierunkach),
- ↔ przemieszczenie w kierunku podłużnym, obroty we wszystkich kierunkach,
- ⊕ przemieszczenia w kierunku podłużnym i poprzecznym, obroty we wszystkich kierunkach.

Na rysunku 6 przedstawiono schematycznie rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu.

Analizowane modele trójprzęsłowych, czterodźwigarowych mostów zespolonych spełniały następujące założenia:

- w przekrojach nad podporami przyjęto poprzecznice podporowe o wysokości równej wysokości dźwigarów, natomiast wzdłuż całej długości mostu zastosowano poprzecznice (o wysokości równej $\frac{1}{2}$ wysokości dźwigara) rozstawione co 6 m,
- mosty były oparte na 16 łożyskach umieszczonych po cztery na czterech, nie skończenie sztywnych podporach; umożliwiały one bądź ograniczały przemieszczenia liniowe wzdłuż osi podłużnej mostu i w kierunku doń prostopadłym,
- do obliczeń założono 5 schematów podparcia („a”, „b”, „c”, „d”, „e”),
- kąt skosu przyjmował wartości: 0°, 10°, 20°, 30° i 45° dla każdego systemu podparcia.



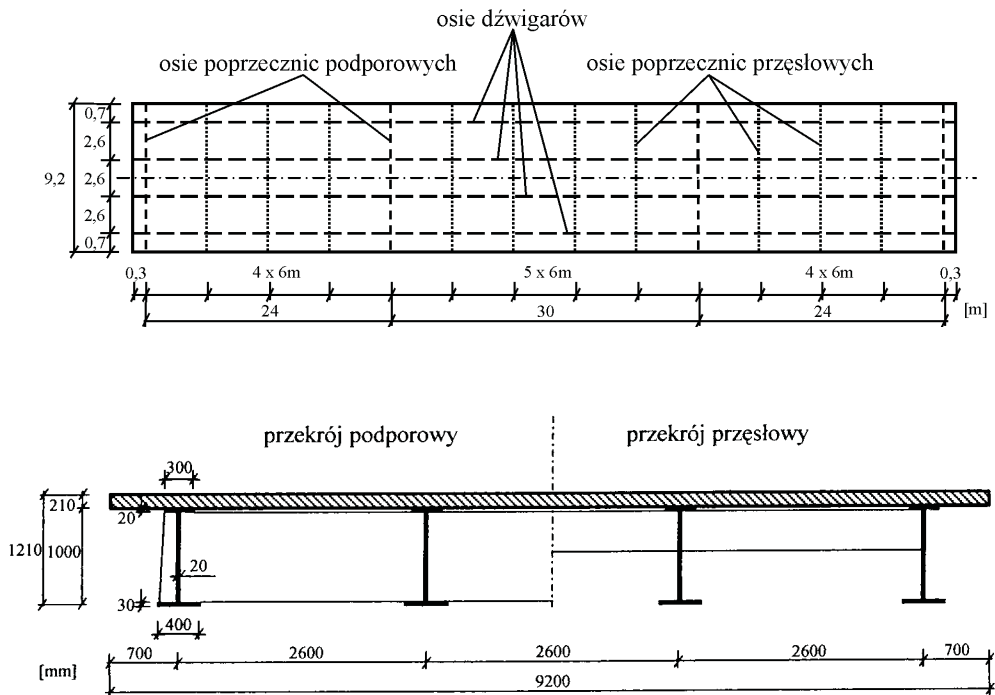
Rys.6. Schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu stalowego z płytą ortotropową dla kąta skosu równego 0°

Fig.6. Layout and cross section of steel bridge, rectangular in plane, with orthotropic deck

Na rysunku 7 przedstawiono schematycznie rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu, zaś na rysunku 8 schematy podparcia mostów zespolonych.

Rozkłady przemieszczeń termicznych w analizowanych mostach wyznaczono numerycznie. Obliczenia przeprowadzono dwuetapowo.

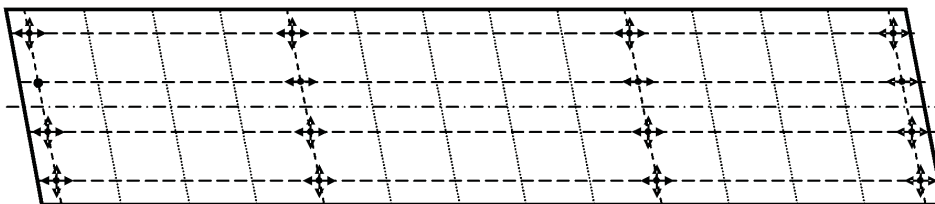
W pierwszej fazie obliczono rozkłady temperatur w przekrojach poprzecznych analizowanych 3 typów mostów (betonowego, stalowego i zespolonego) korzystając z programu FETAB [13]. Była to analiza dwuwymiarowa przeprowadzona dla nieustalonego przepływu ciepła metodą elementów skończonych i elementów brzegowych, z uwzględnieniem wpływu czynników geograficzno-topograficzno-meteorologicznych na natężenia strumieni ciepła działających na poszczególne powierzchnie konstrukcji mostowej. Wśród danych opisujących te czynniki podaje się: położenie mostu nad poziomem morza, szerokość geograficzną miejsca usytuowania mostu, kierunek osi podłużnej mostu, dzień roku rozpoczęcia analizy, maksymalną i minimalną temperaturę powietrza w tym dniu oraz współczynnik zachmurzenia i zanieczyszczenia powietrza.



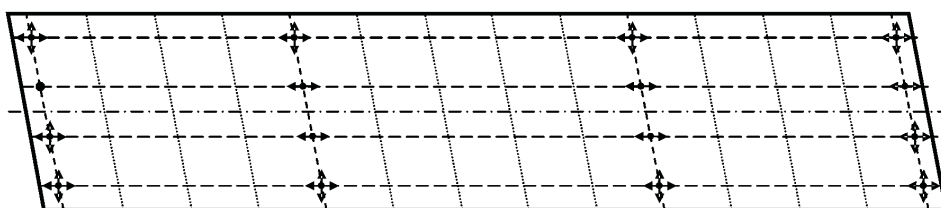
Rys.7. Schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu zespolonego dla kąta skosu równego 0°

Fig.7. Layout and cross section of rectangular in plane composite bridge

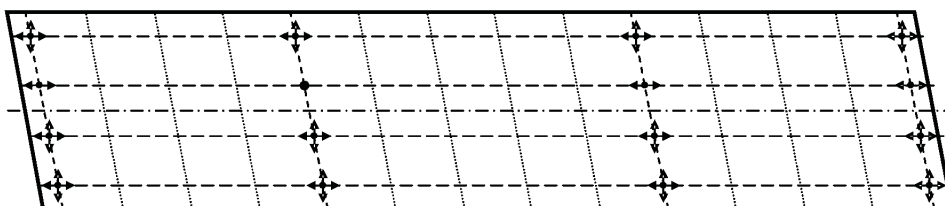
a) pierwszy schemat podparcia mostu zespolonego w skosie



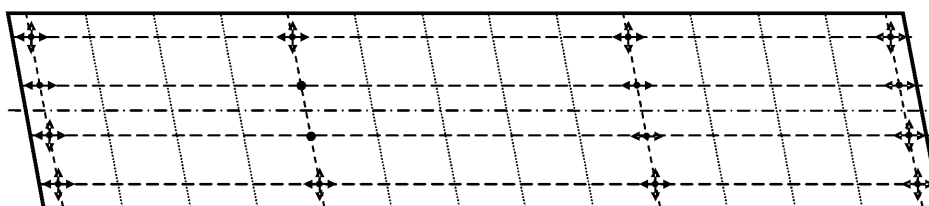
b) drugi schemat podparcia mostu zespolonego w skosie



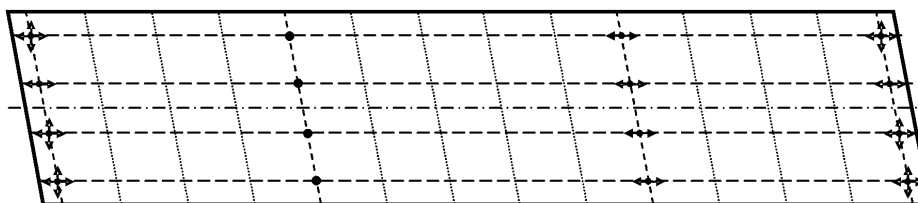
c) trzeci schemat podparcia mostu zespolonego w skosie



d) czwarty schemat podparcia mostu zespolonego w skosie



e) piąty schemat podparcia mostu zespolonego w skosie



Rys.8. Schematy podparcia mostów zespolonych w skosie
(oznaczenia łożysk przyjęto jak na rysunku 5)
Fig.8. Bearing system for composite skew bridge

Przeprowadzono po dwa cykle trzydobowe obliczeń z krokiem trzygodzinnym dla każdego typu przekroju w najcieplejszym i w najzimniejszym okresie roku. Obliczono rozkłady temperatur w węzłach każdego przekroju poprzecznego dla nieustalonego przepływu ciepła. Do obliczenia rozkładu temperatur w przekroju konstrukcji przyjęto temperatury otoczenia na podstawie analizy danych, pomierzonych temperatur w Warszawie z ostatnich 50 lat (Załącznik 4 do [21]). Latem analizę rozpoczęto 19 lipca o godz. 6⁰⁰, a zimą 20 stycznia również o godz. 6⁰⁰. W lipcu średnia najwyższa temperatura powietrza wynosiła 31,3°C, a średnia najniższa temperatura 9,8°C. W styczniu średnia najwyższa temperatura powietrza wynosiła 6,9°C, natomiast średnia najniższa temperatura -15°C. Przyjęto, że oś podłużna mostów była zorientowana była na kierunku wschód – zachód. Takie usytuowanie powoduje, że południowa strona mostu jest bardziej poddana oddziaływaniom Słońca w lecie i w zimie (jest bardziej nasłoneczniona).

W wyniku otrzymano po 30 zestawów wartości temperatur w węzłach betonowego przekroju skrzynkowego - przeszłowego oraz betonowego przekroju pełnego - podporowego, przekroju stalowego i zespolonego dla najcieplejszej oraz najzimniejszej pory roku.

Do dalszych obliczeń wybrano po jednym zestawie temperatur najniższych dla stycznia (21.01 godz. 6⁰⁰) i najwyższych dla lipca (21.07 godz. 15⁰⁰). Zestawy te posłużyły do obciążania węzłów przyjętych modeli przestrzennych mostów w systemie ANSYS [25] oraz obliczenia przemieszczeń konstrukcji mostowych pod wpływem ciężaru własnego i oddziaływań termicznych metodą elementów skończonych. Przy modelowaniu przyjęto ośmiowęzłowy przestrzenny element bryłowy typu SOLID 5. W danym elemencie stopniami swobody były 3 przemieszczenia liniowe (u_x, u_y, u_z) i temperatura T w każdym węźle. Następnie wykonano obliczenia statyczno-termiczne dla ustalonego przepływu ciepła. W wyniku otrzymano rozkłady przemieszczeń termicznych w węzłach analizowanych mostów oraz rozkłady temperatur w przestrzennych modelach mostów.

Na wykresach (rys. 9 ÷ 14) pokazano wartości przemieszczeń podłużnych i poprzecznych w funkcji kąta skosu mostu i w zależności od sposobu podparcia.

Na podstawie analizy powyższych wyników można wyciągnąć następujące wnioski na temat wpływu kąta skosu na rozkład przemieszczeń termicznych:

- przemieszczenia termiczne podłużne oraz przemieszczenia termiczne poprzeczne rosną w sposób nieliniowy wraz ze wzrostem kąta skosu,
- przemieszczenia termiczne poprzeczne są największe wzdłuż dłuższej przekątnej mostu przy oddziaływaniu największej temperatury dodatniej (w lecie); przy oddziaływaniu najmniejszej temperatury ujemnej (w zimie) przemieszczenia te są największe wzdłuż krótszej przekątnej,
- wartości ekstremalnych przemieszczeń termicznych podłużnych są około 9÷10-krotnie większe od przemieszczeń termicznych poprzecznych niezależnie od wzrostu kąta skosu,
- badane mosty wykazują większe przemieszczenia przy obciążeniu temperaturą dodatnią od przemieszczeń przy obciążeniu temperaturą ujemną niezależnie od

kąta skosu (dotyczy to zarówno przemieszczeń podłużnych, jak i przemieszczeń poprzecznych),

- porównując wartości przemieszczeń termicznych dla różnych rodzajów mostów przy zwiększaniu kąta skosu można stwierdzić, że
 - jeśli chodzi o przemieszczenia termiczne podłużne, to zarówno dla mostów prostych, jak i dla mostów w ostrym skosie (45°), największe przemieszczenia termiczne podłużne występują dla mostu stalowego, mniejsze dla zespolonego i najmniejsze dla mostu betonowego,
 - jeśli chodzi o przemieszczenia termiczne poprzeczne, to dla mostów prostych największe wartości osiągają dla mostu stalowego, a dla mostu zespolonego i betonowego wartości przemieszczeń są zbliżone, natomiast dla mostów w ostrym skosie (45°) przy obciążeniu temperaturą dodatnią największe przemieszczenia poprzeczne występują dla mostu stalowego, mniejsze dla mostu zespolonego i najmniejsze dla betonowego, a przy obciążeniu temperaturą ujemną wartości przemieszczeń poprzecznych są porównywalne niezależnie od konstrukcji mostu.

Schemat łożyskowania mostów ma wpływ na wielkość przemieszczeń termicznych, a umiejętne dobranie tego schematu może wpłynąć na rozkład przemieszczeń podłużnych i poprzecznych.

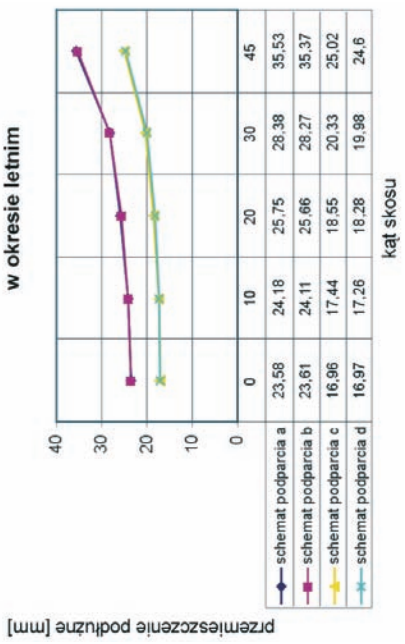
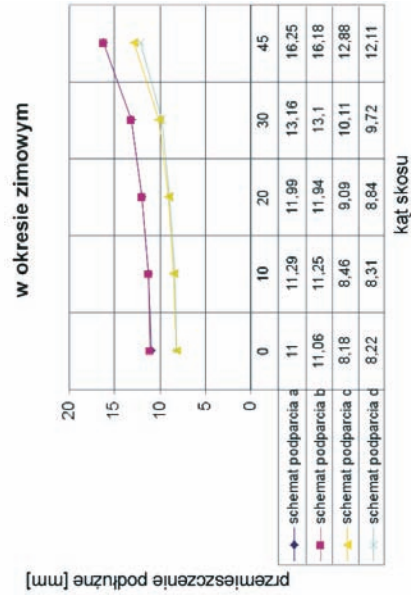
Poniżej zestawiono wartości największych (co do wartości bezwzględnej) przemieszczeń termicznych podłużnych i poprzecznych dla mostów betonowych, stalowych ortotropowych i zespolonych zakładając stały kąt skosu (0° , 10° , 20° , 30° i 45°) i zmieniając schematy podparcia. Dla mostów betonowych i stalowych przyjęto cztery schematy podparcia, natomiast dla mostów zespolonych pięć schematów podparcia. W schematach tych przyjęto łożyska uniemożliwiające przemieszczenia pionowe oraz uniemożliwiające (bądź nie) przemieszczenia podłużne lub poprzeczne. Przyjęte łożyska pozwalały na obroty w dowolnej płaszczyźnie.

W mostach betonowych i stalowych łożysko stałe (uniemożliwiające przemieszczenia liniowe w 3 kierunkach) zlokalizowane było w północno-zachodnim narożu mostu w skosie (schemat „a” i „b”), lub na podporze pośredniej od strony północnej (schemat „c”). W schemacie „d” dla mostów betonowych i stalowych umieszczono 2 łożyska stałe na podporze pośredniej.

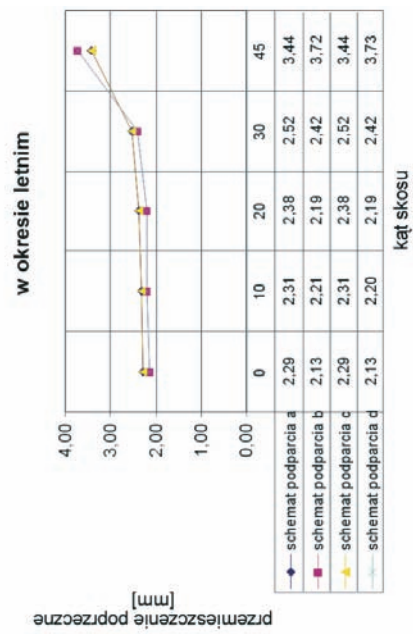
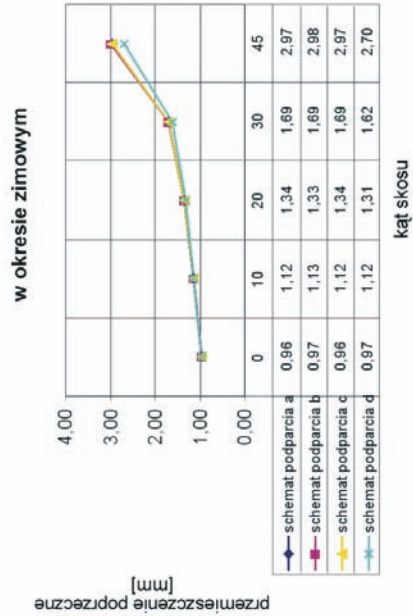
Natomiast w mostach zespolonych czterodźwigarowych w schemacie „a” i „b” łożysko stałe usytuowane było na skrajnej, zachodniej podporze na wewnętrznym dźwigarze od strony północnej. W schemacie „c” łożysko stałe przestawiono na podporę pośrednią, w schemacie „d” zastosowano 2 łożyska stałe na podporze pośredniej, zaś w schemacie „e” na podporze pośredniej umieszczono 4 łożyska stałe.

Szczegóły schematów podparcia pokazano odpowiednio na rysunku 5 dla mostów betonowych i stalowych oraz na rysunku 8 dla mostów zespolonych.

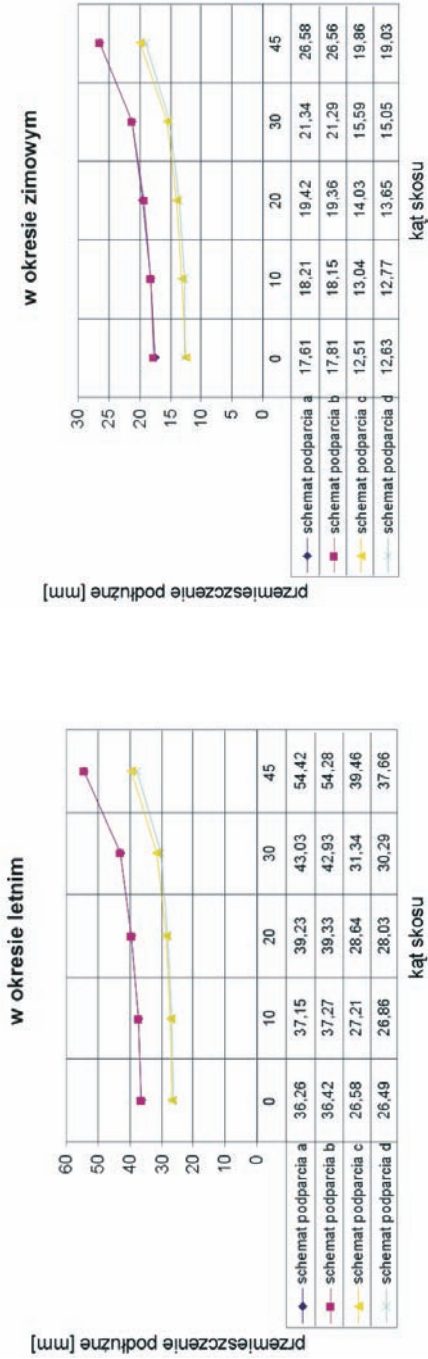
Na rysunku 15 przedstawiono porównanie przemieszczeń termicznych mostów betonowych, na rysunku 16 stalowych mostów ortotropowych i na rysunku 17 mostów zespolonych.



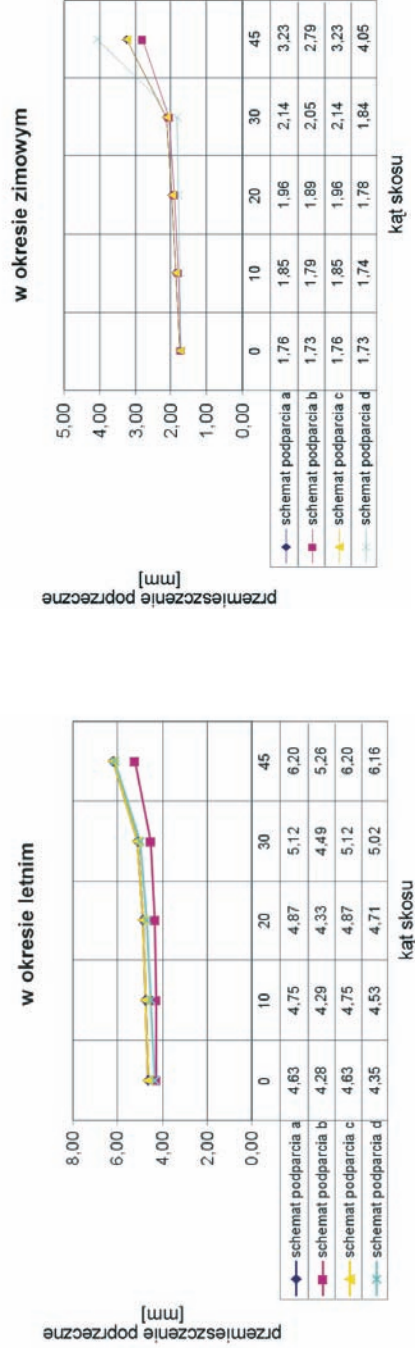
Rys.9. Wykresy przemieszczeń termicznych podłużnych w moście betonowym
Fig.9. Longitudinal thermal movements of concrete bridge



Rys.10. Wykresy przemieszczeń termicznych poprzecznych w moście betonowym
Fig.10. Transverse thermal movements of concrete bridge

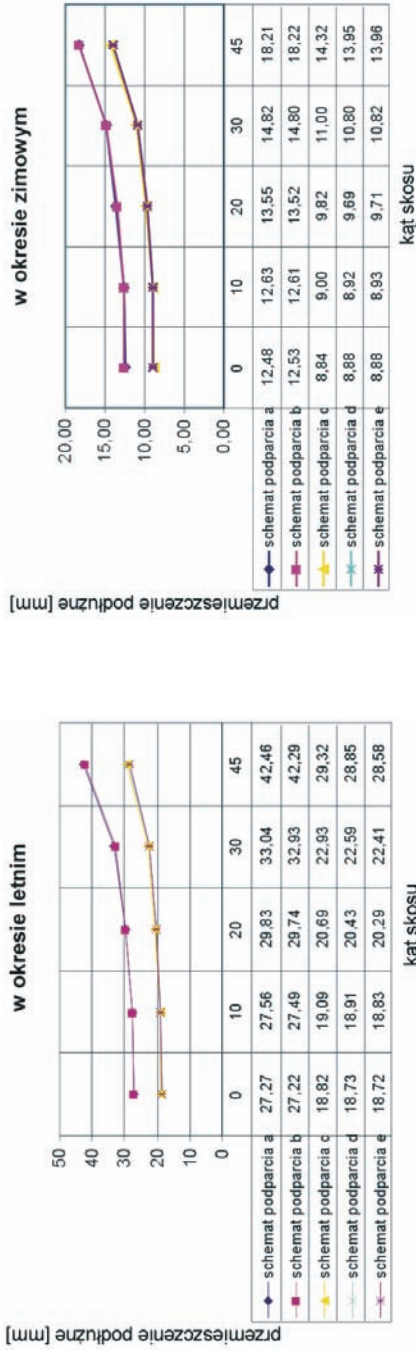


Rys. 11. Wykresy przemieszczeń termicznych podłużnych w moście stalowym



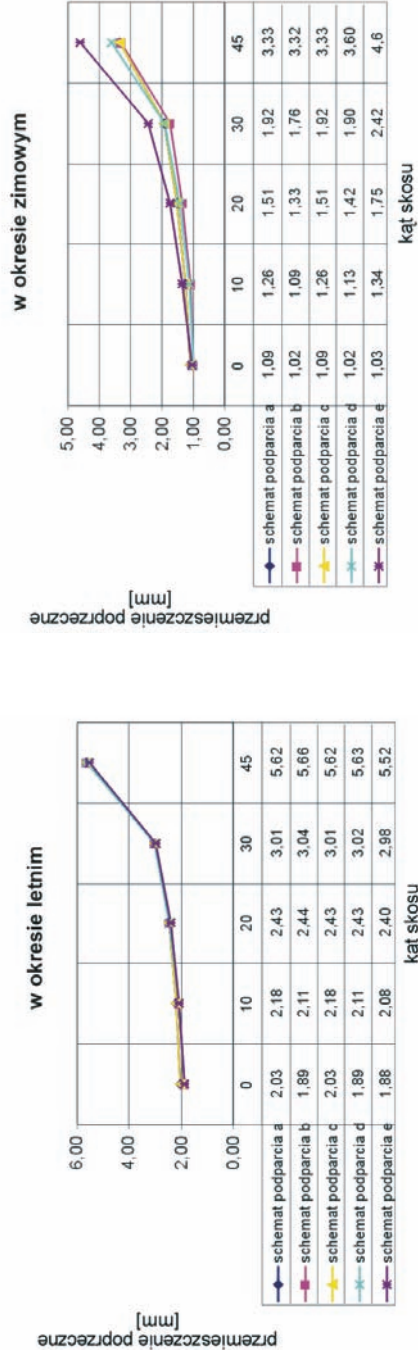
Rys. 12. Wykresy przemieszczeń termicznych poprzecznych w moście stalowym

Fig.12. Transverse thermal movements of steel bridge



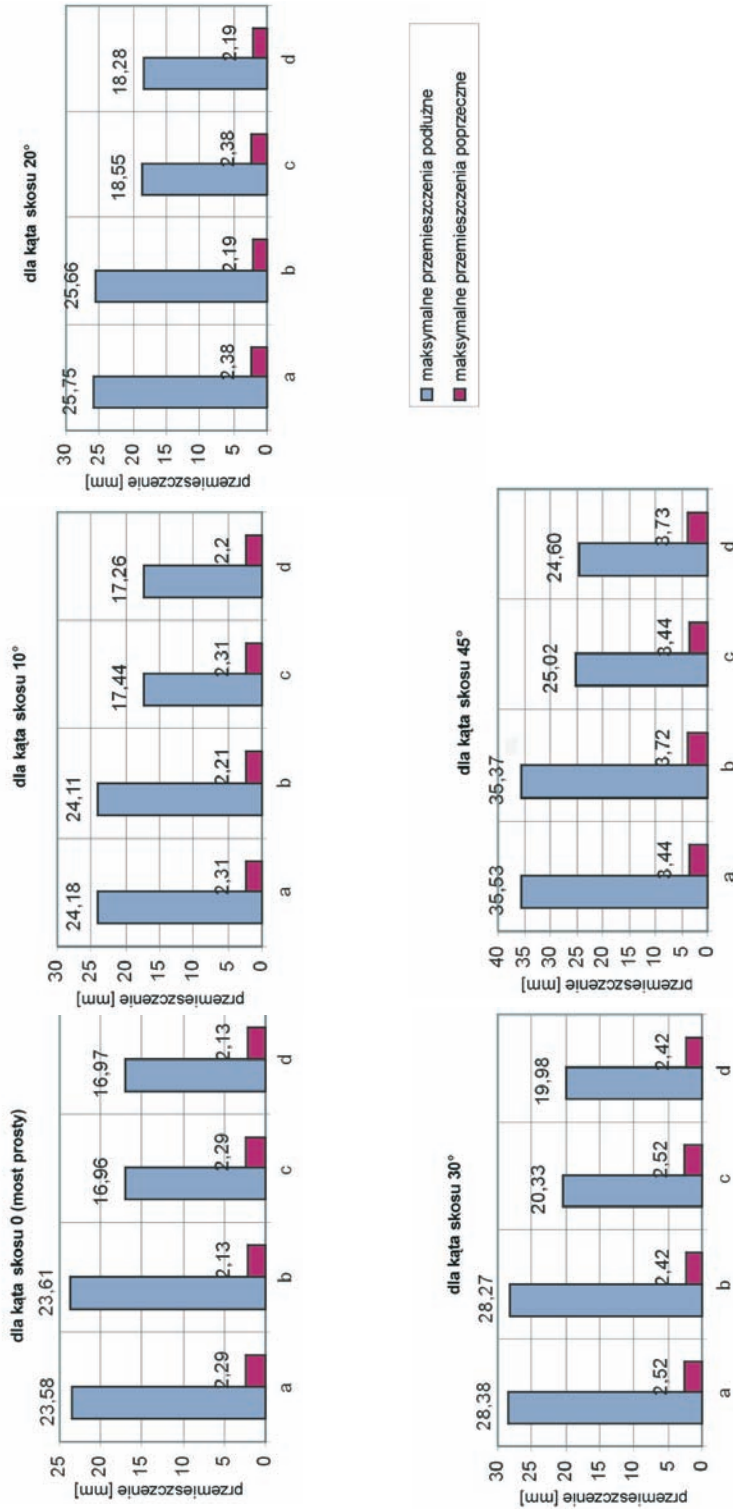
Rys. 13. Wykresy przemieszczeń termicznych podłużnych w moście zespolonym

Fig. 13. Longitudinal thermal movements of composite bridge



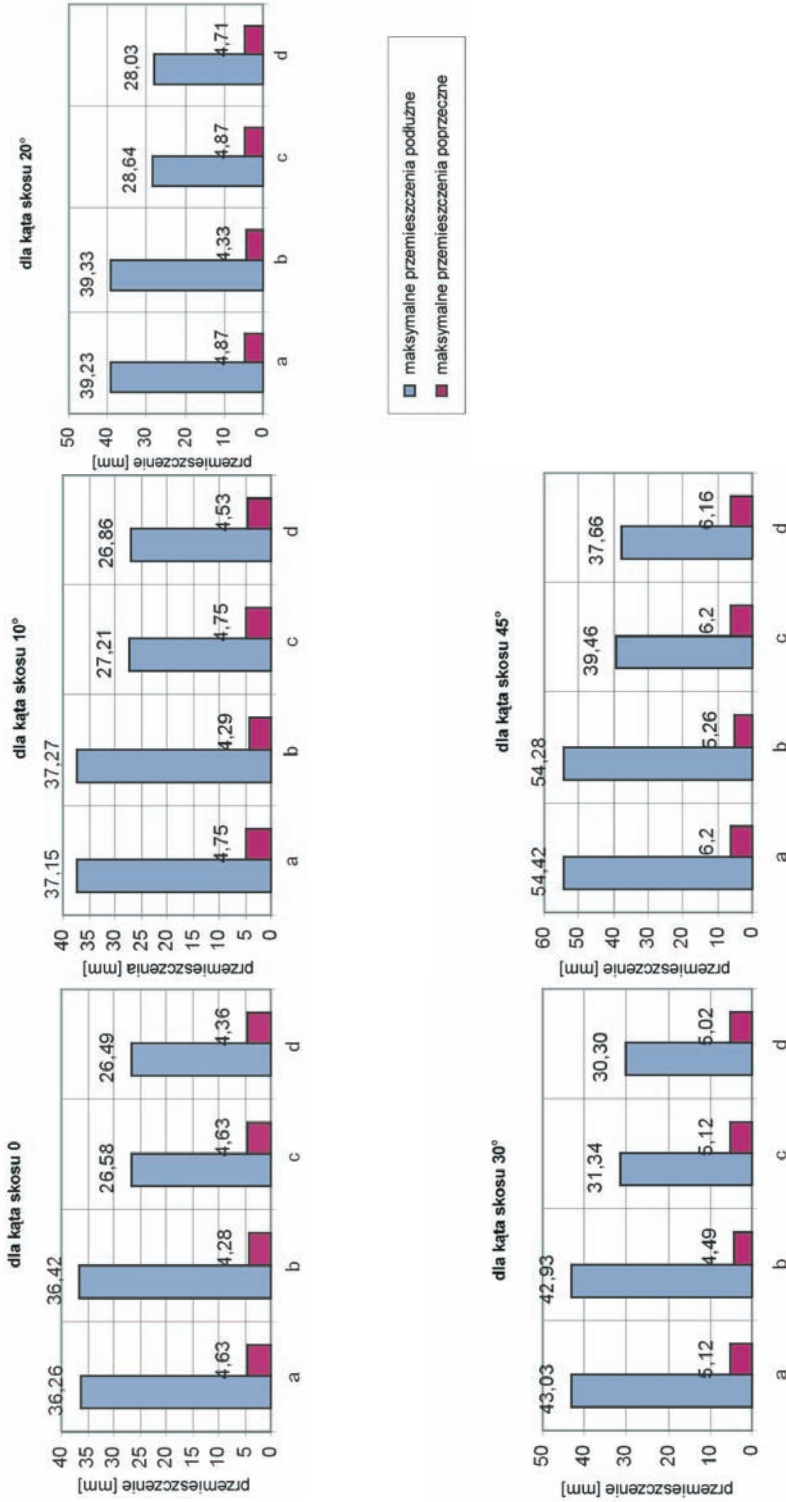
Rys. 14. Wykresy przemieszczeń termicznych poprzecznych w moście zespolonym

Fig. 14. Transverse thermal movements of composite bridge



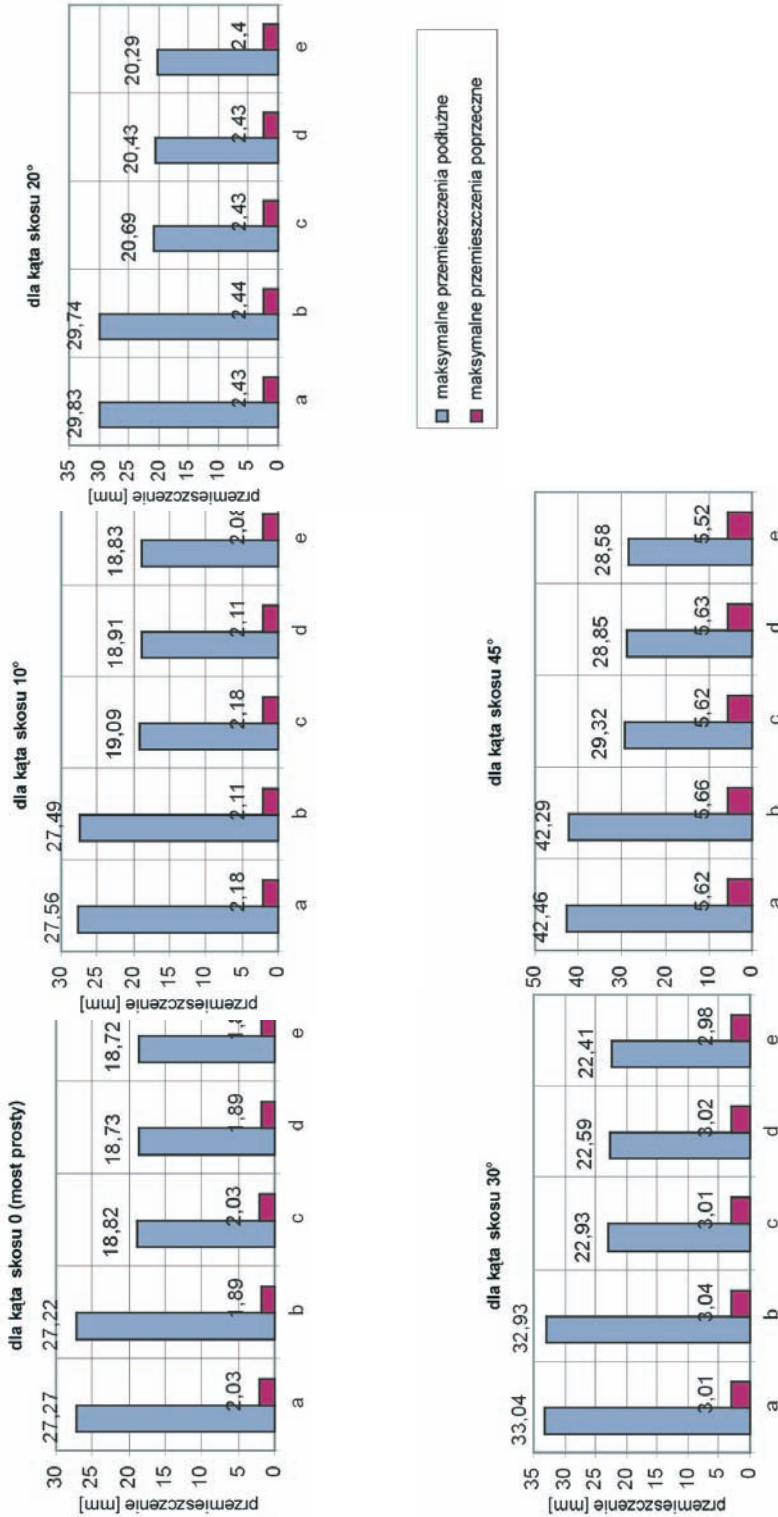
Rys. 15. Wykresy największych przeszyyczeń termicznych podlużnych i poprzecznych w moście betonowym dla różnych schematów podparcia

Fig.15. Extreme longitudinal and transverse thermal movements of concrete bridge for different bearing systems



Rys. 16. Wykresy największych przemieszczeń termicznych podłużnych i poprzecznych w moście stalowym ortotropowym dla różnych schematów podparcia

Fig. 16. Extreme longitudinal and transverse thermal movements of steel bridge for different bearing systems



Rys. 17. Wykresy największych przemieszczeń termicznych podłużnych i poprzecznych w moście zespolonym dla różnych schematów podparcia

Fig. 17. Extreme longitudinal and transverse thermal movements of composite bridge for different bearing systems

Na podstawie analizy rozkładów przemieszczeń termicznych poprzecznych i podłużnych dla przyjętych schematów łożyskowania mostów można wyciągnąć następujące wnioski:

- przemieszczenia poprzeczne są dwukrotnie większe w mostach stalowych niż w pozostałych dla małych kątów skosu ($0^\circ \div 20^\circ$); natomiast dla większych kątów skosu różnice te zaczynają się zacierać;
- dla mostów betonowych:
 - wartości przemieszczeń poprzecznych są dokładnie takie same dla schematów „a” i „c” oraz „b” i „d”;
 - przemieszczenia podłużne osiągną najmniejszą wartość dla schematu „d” niezależnie od wartości kąta skosu, ponieważ zastosowano w nim 2 łożyska stałe; w schemacie tym wystąpi nominalnie najmniejsza wartość przemieszczeń podłużnych spośród wszystkich analizowanych typów konstrukcji mostowych,
 - przemieszczenia podłużne w schematach „a” i „b” przyjmują prawie takie same wartości, zaś w schematach „c” i „d” przemieszczenia podłużne są porównywalne, choć w schemacie „d” nieco mniejsze niż w „c” z powodu zastosowania 2 łożysk stałych,
- dla mostów stalowych:
 - wartości przemieszczeń poprzecznych są dokładnie takie same dla schematów „a” i „c”, w schemacie „b” są nieco mniejsze niż w schemacie „d” z uwagi na zastosowanie większej liczby łożysk ograniczających przemieszczenia poprzeczne,
 - przemieszczenia podłużne osiągną najmniejszą wartość dla schematu „d” niezależnie od wartości kąta skosu, ponieważ zastosowano w nim 2 łożyska stałe,
 - przemieszczenia podłużne w schematach „a” i „b” przyjmują prawie takie same wartości, zaś w schematach „c” i „d” przemieszczenia podłużne są porównywalne, choć w schemacie „d” nieco mniejsze niż w „c”, ponieważ zastosowano 2 łożyska stałe,
- dla mostów zespolonych:
 - najmniejsze przemieszczenia poprzeczne występują w schemacie podparcia „e”, ponieważ na podporach pośrednich odebrano możliwość przemieszczeń poprzecznych,
 - przemieszczenia podłużne osiągną najmniejszą wartość dla schematu „e”, z uwagi na zastosowanie w nim 4 łożysk stałych,
 - w schemacie „a” i „b” powstają prawie takie same przemieszczenia podłużne, przemieszczenia podłużne dla schematów „c”, „d” i „e” są porównywalne, choć dla schematu „e” są nieco mniejsze niż w „c” i „d”, ponieważ umieszczono w nim 4 łożyska stałe na podporze pośredniej,
 - umieszczenie na podporze pośredniej 2 lub 4 łożysk stałych daje zbliżone wartości przemieszczeń termicznych podłużnych, choć wartości te są nieco mniejsze przy zastosowaniu 4 łożysk niż 2.

6. UWAGI O ROZMIESZCZANIU ŁOŻYSK W MOSTACH W SKOSIE

Orientacja i lokalizacja łożysk, ze szczególnym uwzględnieniem położenia łożyska stałego, jest kluczowym parametrem w analizie wielkości i kierunków odkształceń termicznych w mostach w skosie. Problemy napotymane przy rozmieszczaniu łożysk były przedmiotem stosunkowo wielu opracowań szczególnie zagranicznych. W pracach i przedstawiono wskazówki dotyczące wyboru systemu podparcia konstrukcji oraz liczne przykłady systemów podparć różnych typów konstrukcji mostowych. W przedstawiono propozycje doboru i orientacji łożysk w najczęściej stosowanych rodzajach mostów z podziałem na mosty proste, mosty w skosie i zakrzywione w planie (jedno-, dwu- i wielopręsłowe). Uwzględniano także kryterium rodzaju i stopnia podatności łożysk i podpór.

Poniżej podano ważniejsze ogólne zasady wyboru systemu łożyskowania konstrukcji mostowych w skosie.

- łożyskowanie konstrukcji nie powinno całkowicie ograniczać przemieszczeń konstrukcji. System łożyskowania konstrukcji umożliwiający przemieszczenia to system składający się z jednego łożyska stałego, jednego łożyska jednokierunkowo przesuwne, które pozwoli na przemieszczenia w kierunku łożyska stałego i wielokierunkowo przesuwnych łożysk umieszczonych w pozostałych punktach podparcia. Wszystkie łożyska powinny umożliwiać dowolne obroty. Jakakolwiek zmiana w tym podstawowym schemacie podparcia spowoduje powstanie więzów, które będą oddziaływać na całą konstrukcję, nie wyłączając łożysk. Klasyczne łożyska wałkowe i wahaczowe nie spełniają tych wymagań.
- Analiza statyczna konstrukcji przy doborze łożysk powinna zawsze być przeprowadzona z dostatecznymi zapasami bezpieczeństwa. Wybierając łożyska należy uwzględnić ich charakterystyki konstrukcyjne (np. kąt wychylenia w przypadku łożysk garnkowych, zakres przemieszczeń w łożyskach ruchomych itp.) z pewnymi zapasami bezpieczeństwa.
- Przemieszczenia łożysk w mostach betonowych sprężonych w skosie zależą od wielkości siły sprężenia i rosną w czasie z powodu skurczu i pełzania. Natomiast kierunki przemieszczeń zależą od lokalizacji łożyska stałego i rozmieszczenia sprężających prętów zbrojeniowych.
- Montaż i ustawianie łożysk należy przeprowadzić z należytą dokładnością. Najczęściej spotykane błędy w czasie montażu łożysk to brak wypoziomowania łożysk przesuwnych, częściowe zalanie betonem łożysk elastomerowych, zmiana kierunku dopuszczonego przesuwu w łożyskach ruchomych. W ekstremalnych przypadkach błędy popełnione w czasie montażu łożysk mogą spowodować ich uszkodzenie, a nawet zniszczenie.
- łożyska mostowe ulegają zużyciu w trakcie eksploatacji. Trwałość współczesnych łożysk mechanicznych określa się obecnie na 50 lat. Okres ten uległ wydłużeniu np. w porównaniu ze stalowymi łożyskami wałkowymi. Jeśli założymy, że „czas życia” konstrukcji jest dłuższy niż łożysk, które są elementami

podlegającym zużyciu w trakcie eksploatacji obiektu, to już w trakcie projektowania konstrukcji należy uwzględnić konieczność wymiany łożysk.

- O ile w przypadku mostów jedno - i dwuprzęsłowych położenie łożyska stałego jest mało istotne, o tyle w przypadku układów wieloprzęsłowych, aby zmniejszyć wielkość odkształceń termicznych, preferuje się jego lokalizację na którejś z podpór pośrednich. Wymaga to jednak zapewnienia jej odpowiedniej sztywności, co jest istotne nie tylko z punktu widzenia przejścia odkształceń termicznych, ale i również sił hamowania.
- W przypadku mostów wieloprzęsłowych wskazane jest, aby przekroje ustroju niosącego na podporach skrajnych nie miały możliwości obrotu w kierunku prostopadłym do osi przęta. Pozostałe przekroje podporowe mogą mieć taką możliwość. Natomiast wszystkie przekroje podporowe mogą obracać się w kierunku pokrywającym się z osią podłużną mostu.
- W przypadku mostów w skosie najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie łożysk umożliwiających obrót i przesuw w dowolnym kierunku.
- W mostach w skosie, szczególnie z dużym kątem skosu i o szerokości zbliżonej do długości istnieje możliwość odrywania konstrukcji nośnej od łożyska. Konieczne jest wtedy zakotwienie takiego łożyska w podporze.
- Trudno jest jednoznacznie określić, kiedy warto redukować wielkość odkształceń (liniowych czy kątowych) stosując łożyska podatne. Najczęściej dotyczy to sytuacji, kiedy wymieniamy konstrukcję nośną z mniej odkształcalnej na bardziej odkształcalną (np. betonową na zespoloną) przy zachowaniu istniejących podpór.
- Bardzo istotna jest lokalizacja mostu względem stron świata. W przypadku mostów o osi podłużnej na linii wschód-zachód należy przyjąć zasadę, że łożyska stałe powinny znajdować się od strony północnej, natomiast przesuwne od strony południowej.

Przestrzeganie wymienionych zasad pozwala w miarę skutecznie przewidywać i kontrolować wielkości oraz kierunki odkształceń termicznych i zminimalizować wartości naprężeń termicznych w konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Emerson M.*: Bridge Temperature Estimated from Shade Temperature. TRRL Report LR 696, Dept. of Transport, Crowthorne, England, 1976
- [2] *Emerson M.*: Bridge Temperatures and Movements in the British Isels. TRRL Report LR 228, Dept. of Transport, Crowthorne, England, 1969
- [3] *Emerson M.*: Bridge Temperatures for Setting Bearings and Expansion Joints. TRRL Report SR 479, 561, Dept. of Transport, Crowthorne, England, 1978

-
- [4] *Emerson M.*: The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges. TRRL Report SR 561, Dept. of Transport, Crowthorne, England, 1973
- [5] *Emerson M.*: Thermal Movements in Concrete Bridges – Field Measurements and Methods of Prediction. TRRL Report SR 747, Dept. of Transport, Crowthorne, England, 1981
- [6] *Moorty S., Roeder C.W.*: Thermal Response of Skewed Bridges. Proceeding of the Conference: Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering'90, **2**, 343-353
- [7] *Moorty S., Roeder C.W.*: Temperature-Dependent Bridge Movements. Journal of Structural Engineering, **118**, 1090-1105, April 1992
- [8] *Moorty S.*: Thermal movements in bridges. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Washington, Dept. of Civil Engineering, Seattle, 1990
- [9] *Roeder C.W.*: Proposed design method for thermal bridge movement. Journal of Bridge Engineering, 12-19, January/February 2003
- [10] *Roeder C.W.*: Thermal Movement Design Procedures for Steel and Concrete Bridges. Report to the National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., April 2002
- [11] *Roeder C.W.*: Thermal Movement Design Procedures for Steel Bridges. Report to American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., 1997
- [12] *Roeder C.W., Moorty S.*: Thermal Movements in Bridges. Report for NSF, January 1991
- [13] *Elbadry M.M., Ghali A.*: User's Manual for Computer Program FETAB: Finite Element Thermal Analysis of Bridges. Res. Rep. No. CE82-10. Dept. Of Civil Engineering, University of Calgary, Canada, October 1982
- [14] *Zobel H.*: Zjawiska termiczne w stalowych mostach belkowych. Prace Naukowe, Budownictwo, Z. 116. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 200, 1993
- [15] *Zobel H.*: Naturalne zjawiska termiczne w mostach. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 231, Warszawa 2003
- [16] *Zobel H., Sobala D., Kruk M.*: Oddziaływania termiczne w mostach. XLIX Konferencja „Problemy naukowo - badawcze budownictwa”, Krynica, Tom 5, 143-152, wrzesień 2003
- [17] *Zobel H., Sobala D.*: Obciążenia termiczne obiektów mostowych według normy PN 85/S-10030 i Eurocode 1991 - Część 2.5. Drogownictwo nr 12/2000, 374-379
- [18] *Zobel H., Sobala D.*: Temperatura konstrukcji mostowych i ich odkształcenia termiczne. Inżynieria i Budownictwo nr 7/2000, 392-396
- [19] *Zobel H., Sobala D.*: Naturalne oddziaływania termiczne na obiekty mostowe w polskich warunkach klimatycznych. Inżynieria i Budownictwo nr 9/2004, 497-501
- [20] PN-85/S-10030. „Obiekty mostowe. Obciążenia”

- [21] *Sobala D.*: Wpływ wybranych czynników meteorologicznych na odkształcenia przęseł mostów stalowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2002
- [22] EN 1991 – 1.5 wraz z Załącznikiem Krajowym „Oddziaływania termiczne w konstrukcjach”
- [23] EN 1337 – części 1 i 11: „Łożyska konstrukcyjne. Zasady projektowania”
- [24] *Kruk M.*: Wpływ ukształtowania konstrukcji mostowej na sposób jej łożyskowania. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2004
- [25] ANSYS - Engineering Analysis System. SAS Inc, USA
- [26] *Eggert H., Grote J., Kauschke W.*: Lager im Bauwesen. Ernst & Sohn, Berlin, München Düsseldorf 1974
- [27] *Eggert H., Kauschke W.*: Structural Bearings. Ernst & Sohn, Berlin 2002

BEARING SYSTEMS FOR SKEW BRIDGES

Abstract

Selection of bridge bearings is one of important problems in bridge design. Inappropriate bearings selection leads to damage in the bridge or unnecessarily increase costs of bridge structure. In this paper the thermal movement distribution in skewed bridges was calculated for different bearing systems using numerical methods. Three typical types of bridges were selected for numerical analysis: concrete box bridge, two steel girders bridge and four girders composite bridge. Temperature distribution in cross-sections of bridges was calculated using finite element thermal analysis program FETAB for the warmest and coldest time of the year. Next, thermal movement distribution in selected bridges was calculated using ANSYS. An influence of skew angle in skewed bridges on distribution of thermal movements for different bearing systems was also analysed.