



HENRYK ZOBEL¹⁾
MAGDALENA KRUK²⁾
DARIUSZ SOBALA³⁾

ŁOŻYSKOWANIE MOSTÓW ZAKRZYWIONYCH W PLANIE

STRESZCZENIE. Artykuł jest kontynuacją pracy dotyczącej przemieszczeń termicznych w mostach w skosie, przedstawionej w osobnym artykule tego kwartalnika.

Określono rozkłady przemieszczeń termicznych w mostach zakrzywionych w planie przy różnych systemach ich łożyskowania. Rozkłady temperatury w przekrojach poprzecznych mostów obliczono korzystając z programu FETAB. Przy użyciu systemu ANSYS obliczono rozkłady przemieszczeń termicznych w wybranych mostach trójprzęsłowych: betonowych skrzynkowych, dwudźwigarowych stalowych z płytą ortotropową i czterodźwigarowych zespolonych. Analizowano wpływ wartości promienia zakrzywienia na rozkład przemieszczeń termicznych oraz oceniano efektywność stosowania różnych sposobów łożyskowania mostów zakrzywionych w planie.

1. WSTĘP

Łożyska mostowe podpierają ustrój nośny, przenoszą obciążenia pionowe i poziome na filary i przyczółki, a także zapewniają swobodę przemieszczeń liniowych (przesuwów) i kątowych (obrotów) konstrukcji nośnej względem podpór wywołanych między

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

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

³⁾ dr inż. - Katedra Mostów Politechniki Rzeszowskiej

innymi zmianami temperatury. Dokonując wyboru rodzaju łożyska i jego charakterystyk konstrukcyjnych jednym z parametrów, który należy obliczyć są przemieszczenia termiczne, jakich może doznać most. W osobnym artykule tego kwartalnika opisane zostały zagadnienia łożyskowania mostów w skosie. Poniżej przedstawiono wyniki analizy termiczno-wytrzymałościowej dokonanej w celu określenia rozkładów przemieszczeń termicznych przy różnych systemach łożyskowania mostów zakrzywionych w planie. Analizowano wpływ wielkości promienia zakrzywienia na rozkład przemieszczeń termicznych w mostach zakrzywionych w planie przy różnych sposobach podparcia mostów. Należy zaznaczyć, że dotychczas w polskich publikacjach bardzo rzadko zajmowano się systemami łożyskowania mostów zakrzywionych w planie, w tym nie analizowano rozkładów przemieszczeń termicznych przy różnych sposobach łożyskowania mostu.

Uwagi ogólne o przemieszczeniach termicznych mostów przedstawiono w osobnym artykule [1]. Określanie rozkładów temperatury w konstrukcji mostowej i ich zależności od temperatury powietrza było przedmiotem wielu badań i analiz, co znalazło odzwierciedlenie w przepisach normowych stosowanych przy projektowaniu różnego rodzaju mostów np. w [2] i [3]. Zasady określania temperatury konstrukcji mostu i jej rozkładu w przekroju poprzecznym ustroju nośnego mostu przedstawiono w [4 - 5].

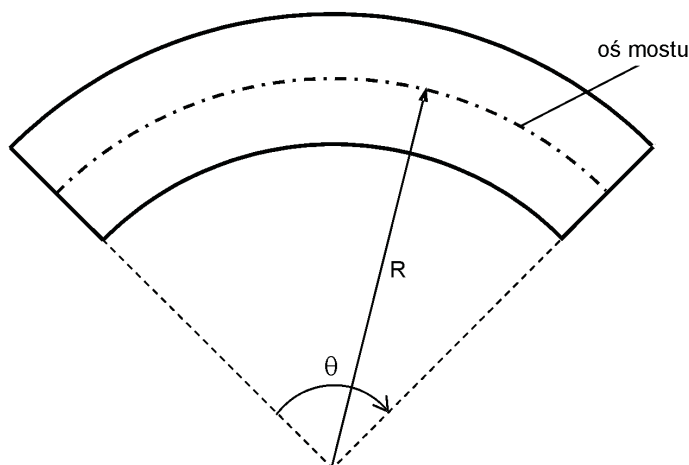
Osobne zagadnienie stanowi obliczanie przemieszczeń termicznych mostów zakrzywionych w planie. Podstawowym problemem jest wtedy właściwa orientacja łożysk. Znacznie większego znaczenia nabiera zagadnienie oporów tarcia w łożyskach i sztywności podpór pośrednich oraz dobór odpowiednich urządzeń dylatacyjnych.

Wzory stosowane do celów projektowych są stosunkowo proste, ale w celu dokładniejszego przeanalizowania pracy konstrukcji mostowej zakrzywionej w planie konieczne jest zastosowanie bardziej skomplikowanych metod zarówno w zakresie modelowania konstrukcji jak i modelowania obciążenia. W [1] zamieszczono wyniki takiej analizy w odniesieniu do mostów w skosie. Poniżej przedstawiono rezultaty badań dotyczących mostów zakrzywionych w planie.

2. PRZEMIESZCZENIA TERMICZNE MOSTÓW ZAKRZYWIONYCH W PLANIE

O ile w mostach w skosie występują przemieszczenia podłużne i poprzeczne, to w mostach zakrzywionych w planie pojawiają się przemieszczenia promieniowe i styczne. Rzeczywisty kierunek przemieszczeń mostów zakrzywionych w planie jest trudny do określenia. W zależności od przyjętej orientacji łożysk pojawiają się w tego typu mostach przemieszczenia wzdłuż cięciwy biegnącej od przyjętego bieguna (łożyska stałego) i wzdłuż stycznej do łuku. Mocno komplikującym czynnikiem jest dość często spotykany fakt umieszczania łożyska stałego na stosunkowo wiotkim filarze, który sam ulega odkształceniom.

Schemat mostu zakrzywionego w planie wraz z oznaczeniem sposobu mierzenia promienia i kąta zakrzywienia pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Schemat mostu zakrzywionego w planie
 R - promień zakrzywienia, θ - kąt zakrzywienia mostu

Fig.1. Layout of curved in plane bridge
 R - radius of bridge curvature, θ - angle of bridge curvature

Rozkład i wielkość przemieszczeń termicznych w mostach zakrzywionych w planie zależy od wielu czynników, wśród których za najważniejsze można uznać: wielkość kąta krzywizny (promienia zakrzywienia) mostu, szerokość mostu, sztywność podpór, w szczególności podpór pośrednich, lokalizację i orientację łożysk, w tym położenie łożyska stałego, rodzaj zastosowanych łożysk itd.

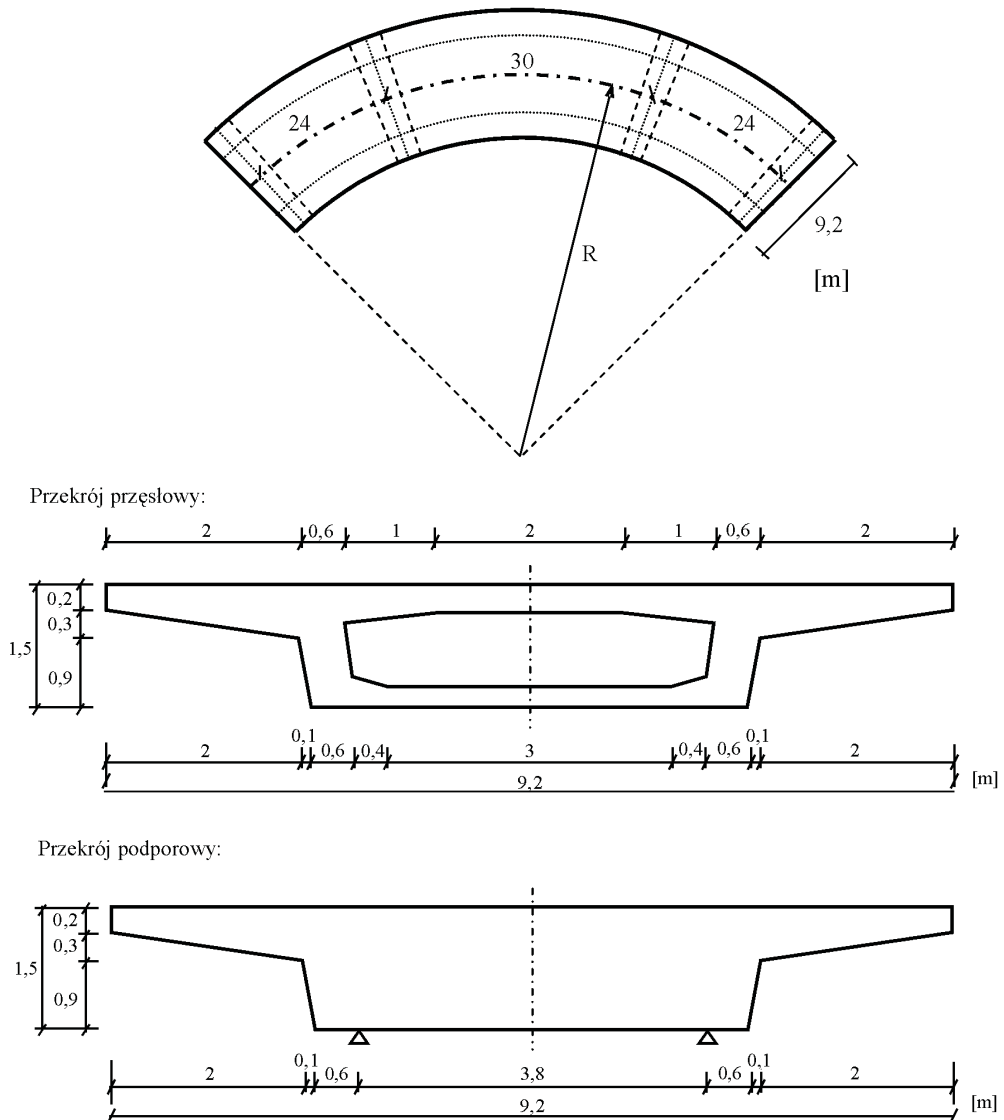
W pracach [6 - 11] podjęto próbę oszacowania wpływu ww. czynników na pracę mostów zakrzywionych w planie przy pomocy analizy parametrycznej. Znacznie bardziej rozbudowaną analizę przeprowadzono w [12]. Badano tam przemieszczenia termiczne mostów zakrzywionych w planie o konstrukcji betonowej i przekroju skrzynkowym, stalowej 2-dźwigarowej z płytą ortotropową oraz zespolonej 4-dźwigarowej powstających w wyniku oddziaływań termicznych zależnie od pory roku, dla zmieniających się wartości promienia zakrzywienia przy różnych schematach podparcia. Analizowano trójprzęsłowe mosty zakrzywione w planie o stycznej do osi podłużnej zorientowanej na linii wschód - zachód i zlokalizowane w Warszawie. Przyjęto konstrukcje o długości całkowitej równej 78 m i rozpiętościach przęsła 24m - 30m - 24 m (mierzonej wzdłuż osi podłużnej mostu) oraz szerokość przęsła 9,2 m.

Modele obliczeniowe mostów betonowych spełniały następujące założenia:

- mosty miały przekrój skrzynkowy (w strefach przypodporowych pełny),
- mosty były oparte na 8 łożyskach umieszczonych po dwa na czterech nieskończone sztywnych podporach, które umożliwiały, bądź ograniczały przemieszczenia liniowe wzdłuż promienia zakrzywienia mostu i w kierunkach doń prostopadłych (6 schematów podparcia), a także wzdłuż cięciw poprowadzonych od łożyska stałego do punktów podparcia (1 schemat podparcia),

- łącznie przyjęto 7 schematów podparcia mostów betonowych,
- promień zakrzywienia mierzony był do osi podłużnej mostu i przyjmował wartości ∞ (most prosty), 500 m, 300 m, 200 m, 100 m i 50 m dla każdego systemu podparcia.

Na rysunku 2 przedstawiono schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu, zaś na rysunku 3 schematy podparcia analizowanych mostów betonowych.



Rys.2. Schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostów betonowych
Fig.2. Layout and cross section of curved in plane concrete bridge

Dwudźwigarowe modele mostów stalowych z płytą ortotropową spełniały następujące założenia:

- w przekrojach nad podporami przyjęto poprzecznice pełne, 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 na czterech nieskończeniu sztywnych podporach,
- przyjęto 7 schematów podparcia takich samych jak dla mostów betonowych (rys. 3),
- promień zakrzywienia mostów przyjmował wartości ∞ (most prosty), 500 m, 300 m, 200 m, 100 m i 50 m dla każdego systemu podparcia.

Na rysunku 4 przedstawiono schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu stalowego zakrzywionego w planie.

Obliczeniowe modele czterodźwigarowych mostów zespolonych spełniały następujące założenia:

- w przekrojach nad podporami założono poprzecznice o wysokości równej wysokości dźwigarów, natomiast wzdłuż całej długości mostu zastosowano poprzecznice (o wysokości równej 1 wysokości dźwigara) rozstawione co 6 m;
- mosty były oparte na 16 łożyskach umieszczonych po cztery na czterech nieskończeniu sztywnych podporach, które umożliwiały, bądź ograniczały przemieszczenia liniowe wzdłuż stycznych do osi mostu i w kierunkach prostopadły do tych stycznych,
- przyjęto 6 schematów podparcia,
- promień zakrzywienia mostów przyjmował wartości ∞ (most prosty), 500 m, 300 m, 200 m, 100 m i 50 m dla każdego systemu podparcia.

Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostu, zaś na rysunku 6 przedstawiono schematy podparcia analizowanych mostów zespolonych. Należy tu zauważyć, że niektóre schematy podparcia mostów dotyczą obiektów nowych, natomiast inne zdarzają się po wielu latach eksploatacji wskutek zablokowania się możliwości przemieszczeń.

Rozkłady przemieszczeń termicznych w analizowanych mostach wyznaczono numerycznie przy wykorzystaniu programów FETAB [13] i ANSYS [14]. W pierwszej fazie obliczono rozkłady temperatur w przekrojach poprzecznych analizowanych 3 typów mostów korzystając z programu FETAB. Była to analiza dwuwymiarowa przeprowadzona, analogicznie jak w [1], dla nieustalonego przepływu ciepła metodą elementów skończonych i elementów brzegowych.

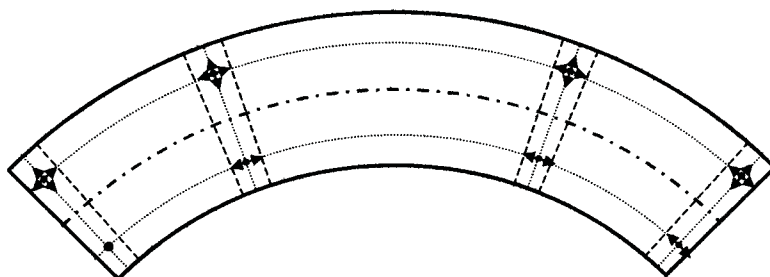
Do obliczenia rozkładu temperatur w przekroju konstrukcji przyjęto temperatury otoczenia na podstawie analizy danych, pomierzonych temperatur w Warszawie z ostatnich 50 lat (Załącznik 4 do [15]). Latem analizę rozpoczęto 19 lipca o godz. 6⁰⁰, a zimą 20 stycznia również o godz. 6⁰⁰. Jak wspomniano przy opisie modeli mostów zakrzywionych w planie styczna do osi podłużnej mostu zorientowana była na linii wschód - zachód. Modele mostów zostały tak usytuowane względem stron świata, że każdy łuk zwrócony był stroną wypukłą w kierunku południowym. Takie usytuowanie mostów powoduje, że południowa strona mostu jest bardziej poddana oddziaływaniom Słońca w lecie i w zimie (jest bardziej nasłoneczniona).

Z analizy termicznej wykonywanej przy użyciu programu FETAB otrzymano po 30 zestawów rozkładów temperatur w węzłach przekrojów poprzecznych przyjętych do analizy mostów dla najcieplejszej i najzimniejszej pory roku. Spośród otrzymanych zestawów wybrano po jednym zestawie temperatur najniższych dla stycznia i najwyższych dla lipca, które wykorzystano do obciążenia węzłów elementów skończonych przyjętych obliczeniowych modeli przestrzennych mostów w systemie ANSYS.

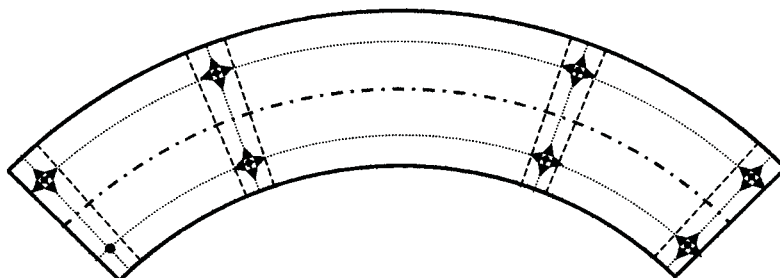
Przy modelowaniu w systemie ANSYS przyjęto ośmiowęzłowy przestrzenny element bryłowy typu SOLID 5. W danym elemencie stopniami swobody były 3 przemieszczenia liniowe (u_x , u_y , u_z) i temperatura T w każdym węźle. Elementy skończone obciążono dodatkowo tylko ciężarem własnym, aby otrzymane przemieszczenia poziome nie były zaburzone dodatkowymi wielkościami spowodowanymi innymi rodzajami obciążeń mostowych. Następnie wykonano obliczenia statyczno-termiczne dla ustalonego przepływu ciepła. W wyniku otrzymano rozkłady termicznych przemieszczeń w węzłach analizowanych mostów oraz rozkłady przemieszczeń promieniowych i stycznych w przestrzennych modelach mostów.

Poniżej sporządzono wykresy zależności ekstremalnych termicznych przemieszczeń promieniowych i stycznych od promienia krzywizny dla różnych sposobów podparcia. Odpowiednie wykresy pokazano poniżej, dla mostów betonowych skrzynkowych (rys. 7 i 8), stalowych ortotropowych (rys. 9 i 10) i zespolonych (rys. 11 i 12).

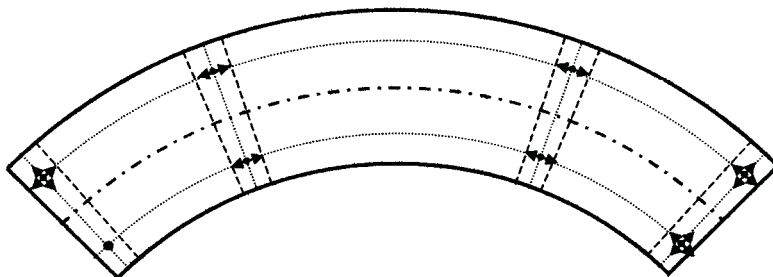
Schemat pierwszy („a”) podparcia mostu



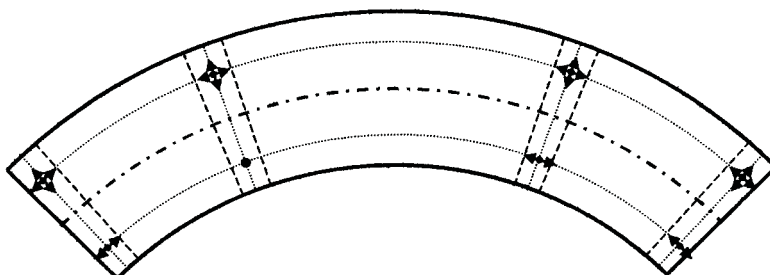
Schemat drugi („b”) podparcia mostu



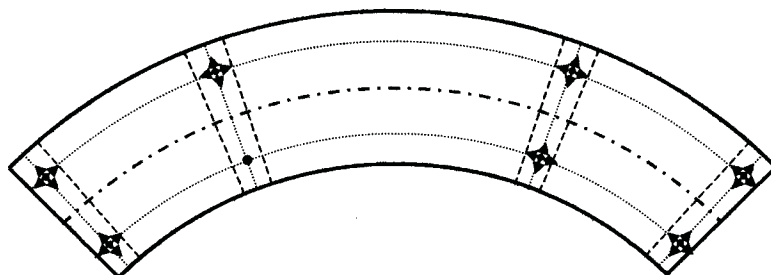
Schemat trzeci („c”) podparcia mostu



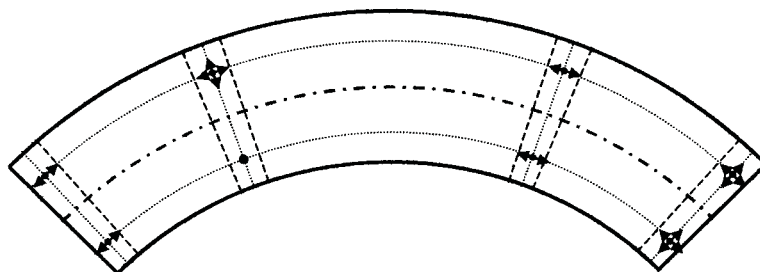
Schemat czwarty („d”) podparcia mostu



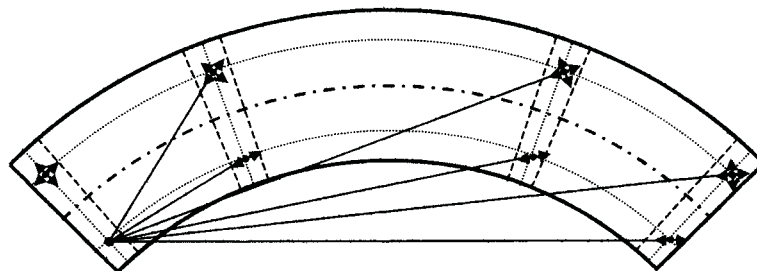
Schemat piąty („e”) podparcia mostu



Schemat szósty („f”) podparcia mostu



Schemat siódmy („g”) podparcia mostu

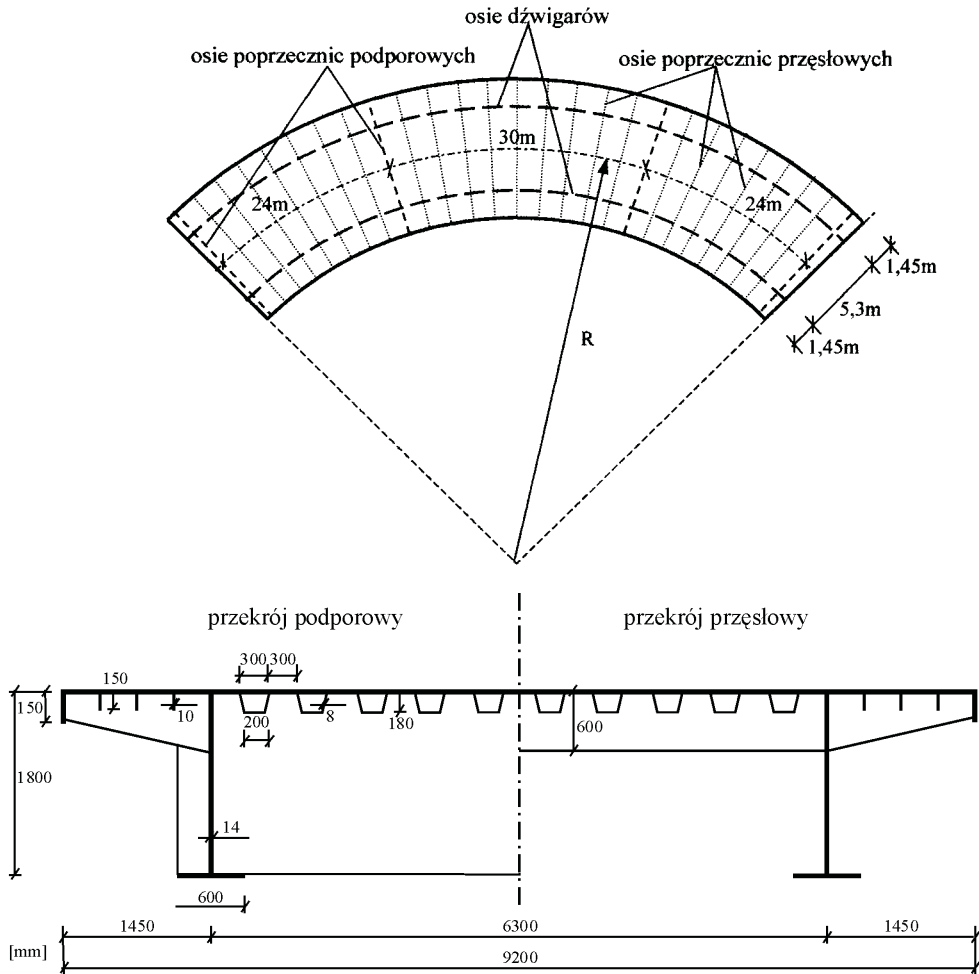


Rys.3. Schematy podparcia mostów betonowych zakrzywionych w planie

Oznaczenia łożysk:

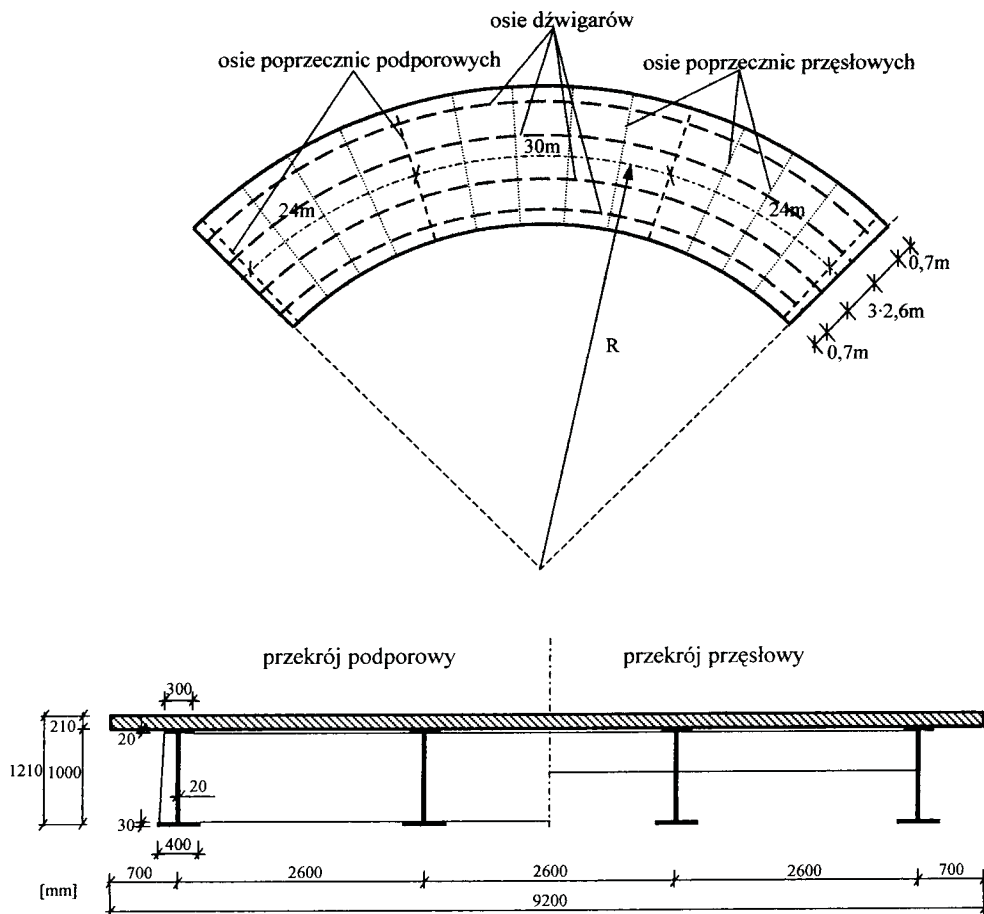
- brak przemieszczeń liniowych we wszystkich kierunkach
(obroty możliwe we wszystkich kierunkach)
- ↔ przemieszczenie w jednym kierunku, obroty we wszystkich kierunkach
- ✦ przemieszczenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach,
obroty we wszystkich kierunkach

Fig.3. Bearing systems for curved in plane concrete bridges



Rys.4. Schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostów stalowych z płytą ortotropową zakrzywionych w planie
 Fig.4. Layout and cross section of curved in plane steel bridge with orthotropic deck

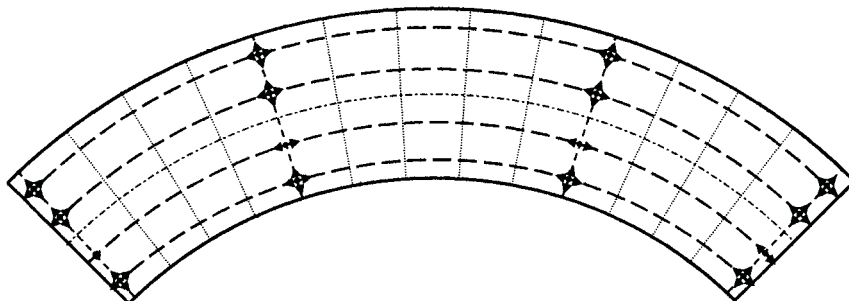
Do obliczenia rozkładu temperatur w przekroju konstrukcji przyjęto temperatury otoczenia na podstawie analizy danych, pomierzonych temperatur w Warszawie z ostatnich 50 lat (Załącznik 4 do [15]). Latem analizę rozpoczęto 19 lipca o godz. 6⁰⁰, a zimą 20 stycznia również o godz. 6⁰⁰. Jak wspomniano przy opisie modeli mostów zakrzywionych w planie styczna do osi podłużnej mostu zorientowana była na linii wschód - zachód. Modele mostów zostały tak usytuowane względem stron świata, że każdy łuk zwrócony był stroną wypukłą w kierunku południowym. Takie usytuowanie mostów powoduje, że południowa strona mostu jest bardziej poddana oddziaływaniom Słońca w lecie i w zimie (jest bardziej nasłoneczniona).



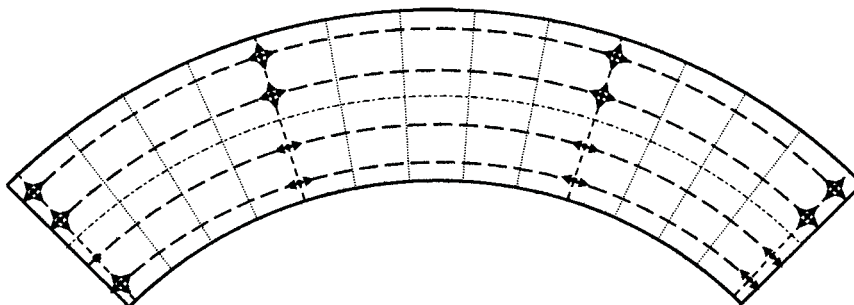
Rys.5. Schematyczny rzut poziomy i przekrój poprzeczny mostów zespolonych
 Fig.5. Layout and cross section of curved in plane composite bridge

Z analizy termicznej wykonywanej przy użyciu programu FETAB otrzymano po 30 zestawów rozkładów temperatur w węzłach przekrojów poprzecznych przyjętych do analizy mostów dla najcieplejszej i najzimniejszej pory roku. Spośród otrzymanych zestawów wybrano po jednym zestawie temperatur najniższych dla stycznia i najwyższych dla lipca, które wykorzystano do obciążenia węzłów elementów skończonych przyjętych obliczeniowych modeli przestrzennych mostów w systemie ANSYS.

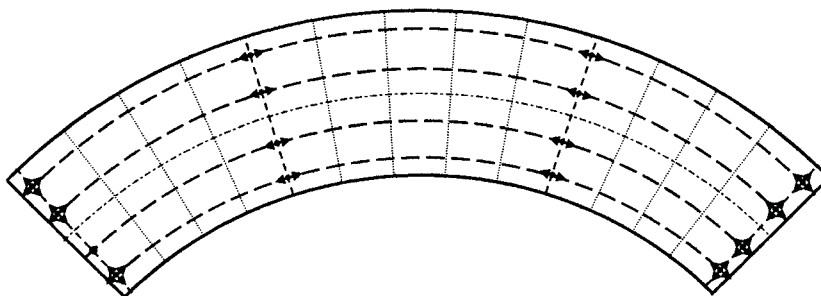
Schemat pierwszy („a”) podparcia mostu



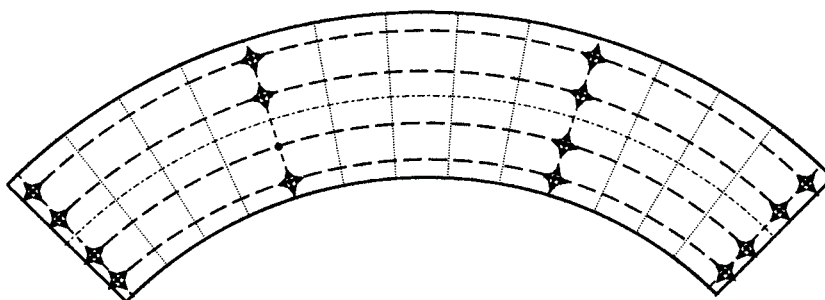
Schemat drugi („b”) podparcia mostu

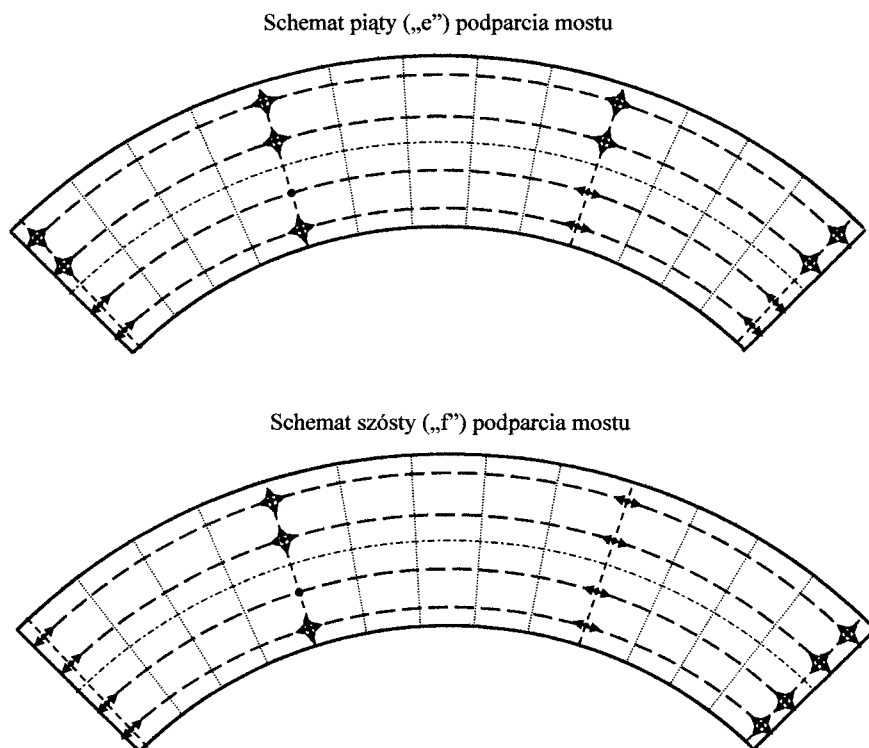


Schemat trzeci („c”) podparcia mostu



Schemat czwarty („d”) podparcia mostu



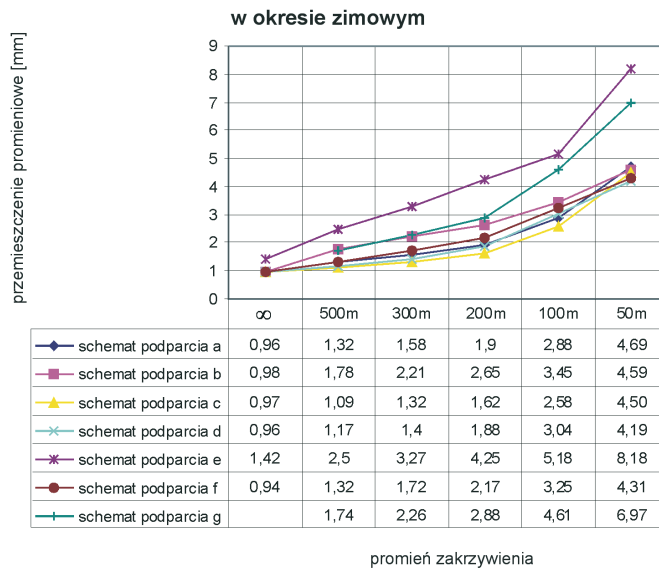
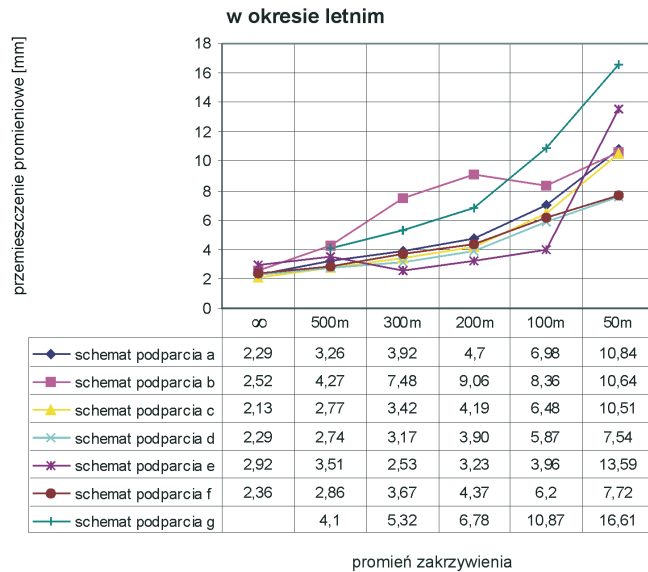


Rys.6. Schematy podparcia mostów zespolonych zakrzywionych w planie
(oznaczenia jak na rys. 3)

Fig.6. Bearing systems for curved in plane composite bridges

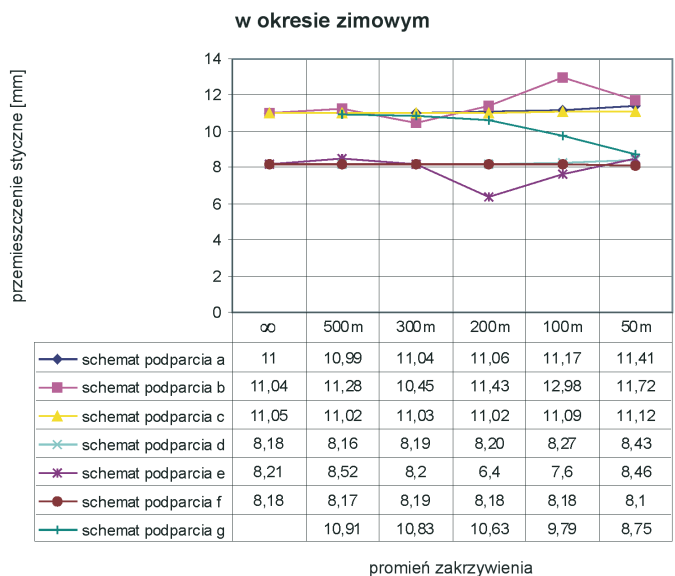
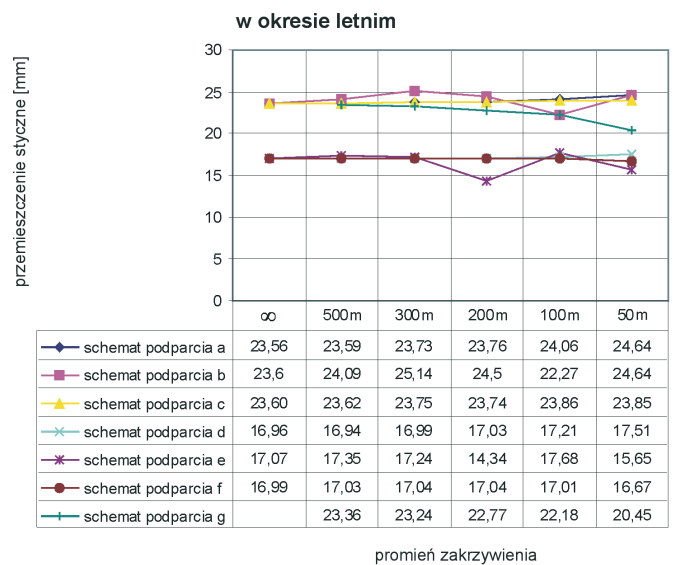
Przy modelowaniu w systemie ANSYS przyjęto ośmiowzłowy przestrzenny element bryłowy typu SOLID 5. W danym elemencie stopniami swobody były 3 przemieszczenia liniowe (u_x , u_y , u_z) i temperatura T w każdym węźle. Elementy skończone obciążono dodatkowo tylko ciężarem własnym, aby otrzymane przemieszczenia poziome nie były zaburzone dodatkowymi wielkościami spowodowanymi innymi rodzajami obciążeń mostowych. Następnie wykonano obliczenia statyczno-termiczne dla ustalonego przepływu ciepła. W wyniku otrzymano rozkłady termicznych przemieszczeń w węzłach analizowanych mostów oraz rozkłady przemieszczeń promieniowych i stycznych w przestrzennych modelach mostów.

Poniżej sporządzono wykresy zależności ekstremalnych termicznych przemieszczeń promieniowych i stycznych od promienia krzywizny dla różnych sposobów podparcia. Odpowiednie wykresy pokazano poniżej, dla mostów betonowych skrzynkowych (rys. 7 i 8), stalowych ortotropowych (rys. 9 i 10) i zespolonych (rys. 11 i 12).

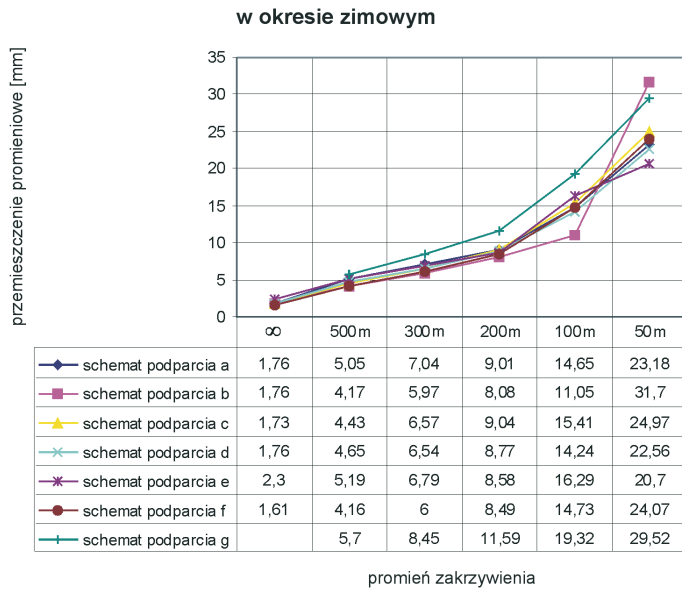
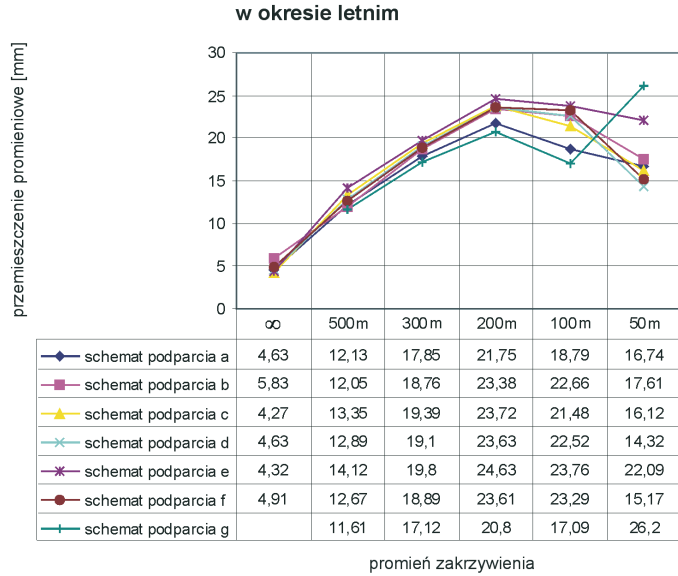


Rys.7. Wykresy przemieszczeń termicznych promieniowych w moście betonowym w funkcji promienia krzywizny

Fig.7. Radial thermal movements of concrete bridge

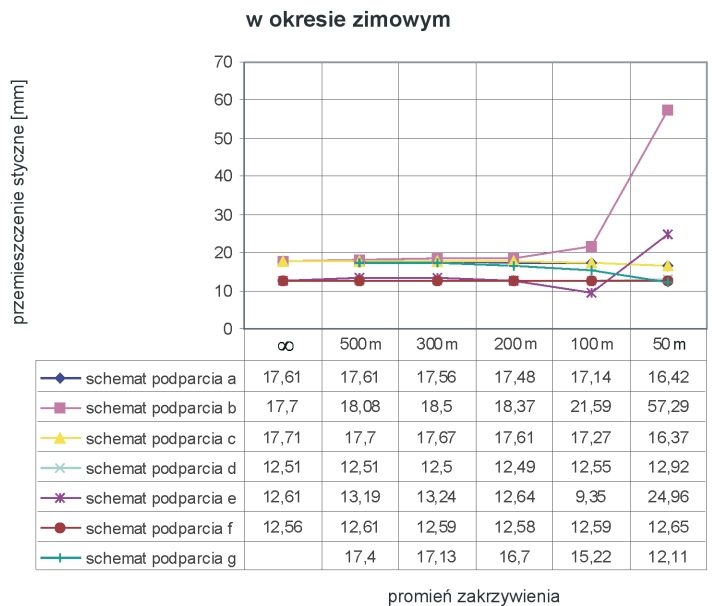
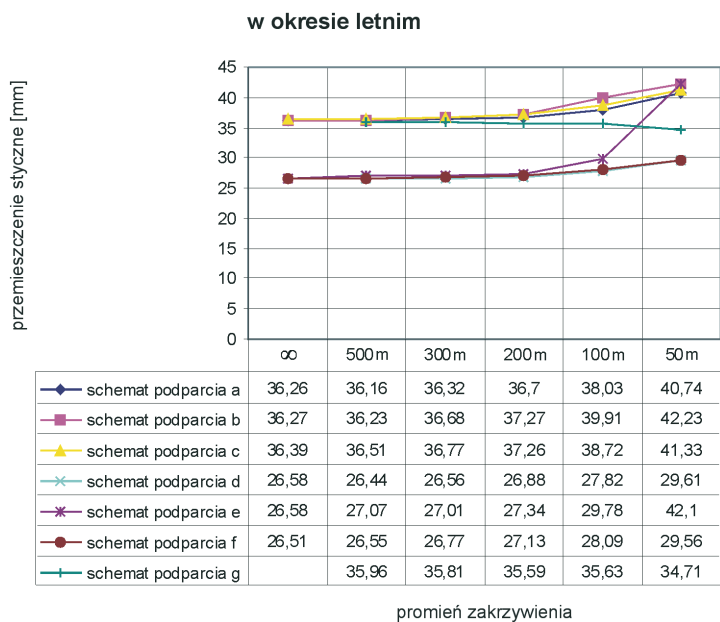


Rys.8. Wykresy przemieszczeń termicznych stycznych w moście betonowym w funkcji promienia krzywizny
 Fig.8. Tangential thermal movements of concrete bridge



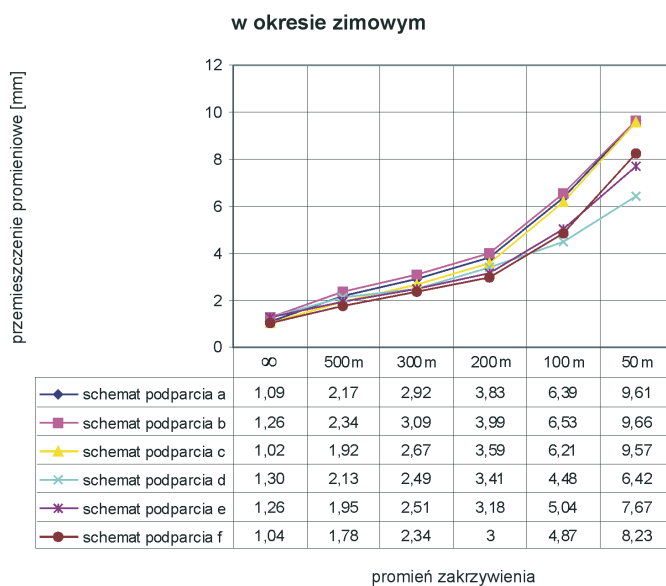
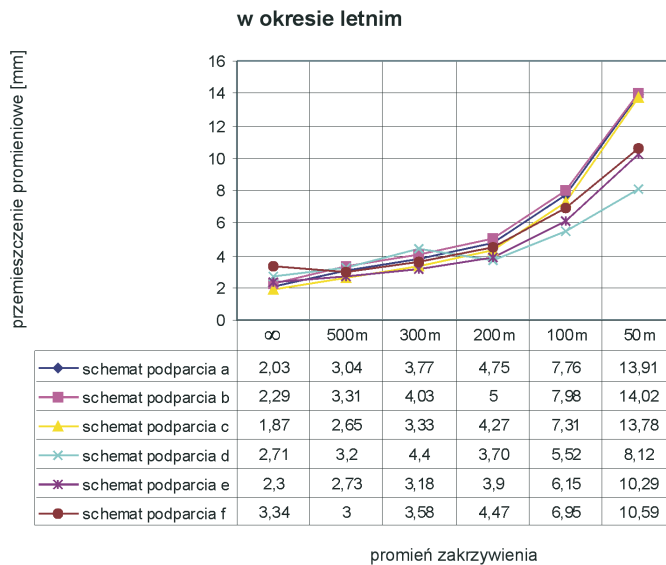
Rys.9. Wykresy przemieszczeń termicznych promieniowych w moście stalowym w funkcji promienia krzywizny

Fig.9. Radial thermal movements of steel bridge



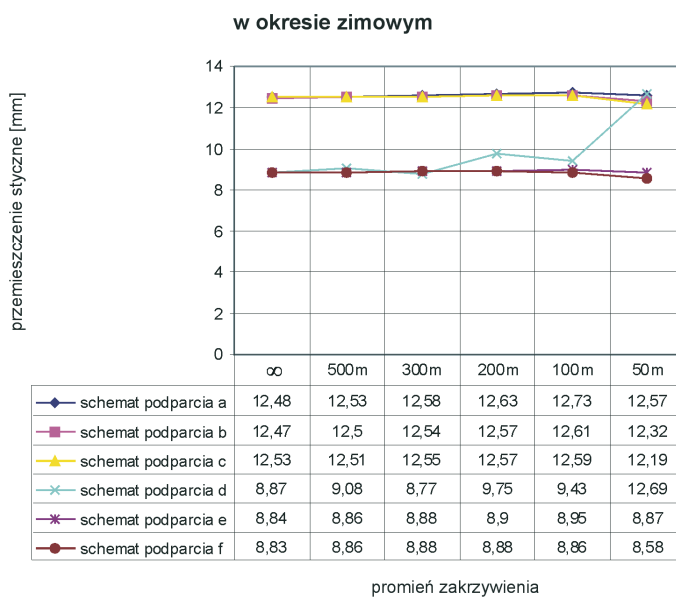
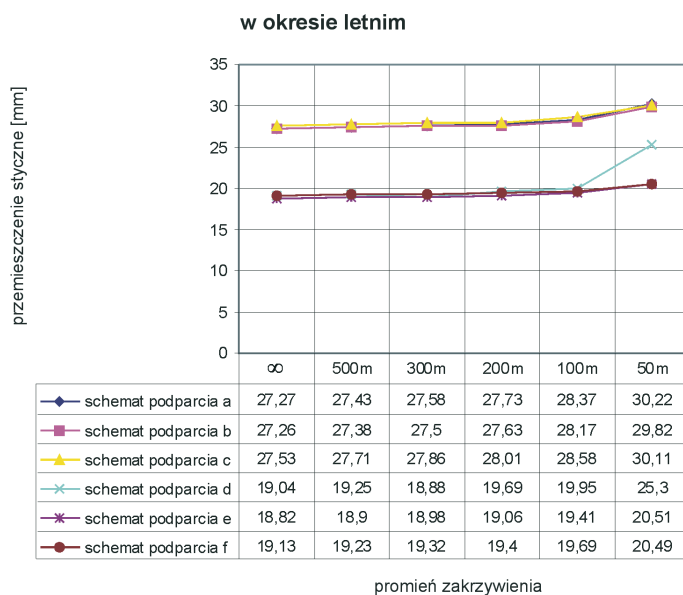
Rys.10. Wykresy przemieszczeń termicznych stycznych w moście stalowym stalowym w funkcji promienia krzywizny

Fig.10. Tangential thermal movements of steel bridge



Rys.11. Wykresy przemieszczeń termicznych promieniowych w moście zespolonym w funkcji promienia krzywizny

Fig.11. Radial thermal movements of composite bridge



Rys.12. Wykresy przemieszczeń termicznych stycznych w moście zespolonym w funkcji promienia krzywizny
 Fig.12. Tangential thermal movements of composite bridge

Analizując powyższe wykresy można dojść do następujących wniosków:

- w mostach betonowych i zespolonych przemieszczenia termiczne promieniowe rosną wraz ze wzrostem zakrzywienia mostu; w mostach stalowych wzrost przemieszczeń promieniowych przy wzroście zakrzywienia jest widoczny przy obciążeniu najniższą temperaturą w zimie oraz dla większych promieni zakrzywienia przy obciążeniu najwyższą temperaturą w lecie, natomiast dla mostów stalowych ostro zakrzywionych obciążonych temperaturą w lecie występuje zaburzenie tej zasady (rys. 9),
- przemieszczenia termiczne styczne przyjmują zbliżone wartości przy zmianie promienia krzywizny niezależnie od rodzaju konstrukcji mostu i wartości obciążenia termicznego, aczkolwiek wartości przemieszczeń promieniowych i stycznych dla schematu podparcia „b” i „e” mostów betonowych odbiegają nieco od tej zasady,
- dla mostów trójprzęsłowych ostro zakrzywionych (o małym promieniu krzywizny) strefa największych przemieszczeń promieniowych jest usytuowana w środkowym przęśle od strony wypukłej łuku mostu niezależnie od rodzaju konstrukcji,
- dla mostów betonowych i zespolonych przemieszczenia styczne są większe od przemieszczeń promieniowych, ale im bardziej most jest zakrzywiony tym różnice między wartościami przemieszczeń stycznych i promieniowych są mniejsze,
- dla mostów stalowych zasada ta potwierdza się przy oddziaływaniu termicznym w lecie, a przy oddziaływaniu termicznym w zimie dla mostów ostro zakrzywionych (gdy $R = 50$ m, $R = 100$ m) przemieszczenia promieniowe i styczne osiągają zbliżone wartości,
- przy porównywaniu wartości przemieszczeń termicznych można stwierdzić, że:
 - dla mostów o dużym promieniu krzywizny ($R = 500$ m) największe przemieszczenia promieniowe wystąpią dla mostów stalowych, a dla mostów betonowych i zespolonych przemieszczenia promieniowe są bardzo podobne i około 4 razy mniejsze od przemieszczeń promieniowych dla mostów stalowych,
 - dla mostów o dużym promieniu krzywizny ($R = 500$ m) największe przemieszczenia styczne zaobserwowano dla mostów stalowych, a dla mostów betonowych i zespolonych są to zbliżone wartości,
 - dla mostów ostro zakrzywionych w planie ($R = 50$ m) otrzymano największe przemieszczenia promieniowe dla mostów stalowych, a bardzo zbliżone do siebie wartości dla mostów betonowych i zespolonych,
 - dla mostów ostro zakrzywionych w planie ($R = 50$ m) największe wartości przemieszczeń stycznych otrzymano dla mostów stalowych, mniejsze dla mostów zespolonych a najmniejsze dla mostów betonowych.

Na rozkład i wielkość przemieszczeń termicznych ma wpływ schemat łożyskowania i lokalizacja łożyska (łożysk) stałych. W sposób istotny wpływa to na rozkład przemieszczeń termicznych promieniowych i stycznych, a także na dobór urządzeń dylatacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń zestawiono poniżej wartości największych (co do wartości bezwzględnej) przemieszczeń termicznych promieniowych i stycznych na końcach analizowanych mostów betonowych, stalowych i zespolonych zakładając stały promień krzywizny R i zmieniając schematy podparcia. Są to największe przemieszczenia spośród przemieszczeń otrzymanych wskutek działania największej temperatury (w lecie) i najmniejszej temperatury (w zimie). Wartości tych przemieszczeń termicznych na końcach mostów mają znaczenie przy doborze urządzeń dylatacyjnych.

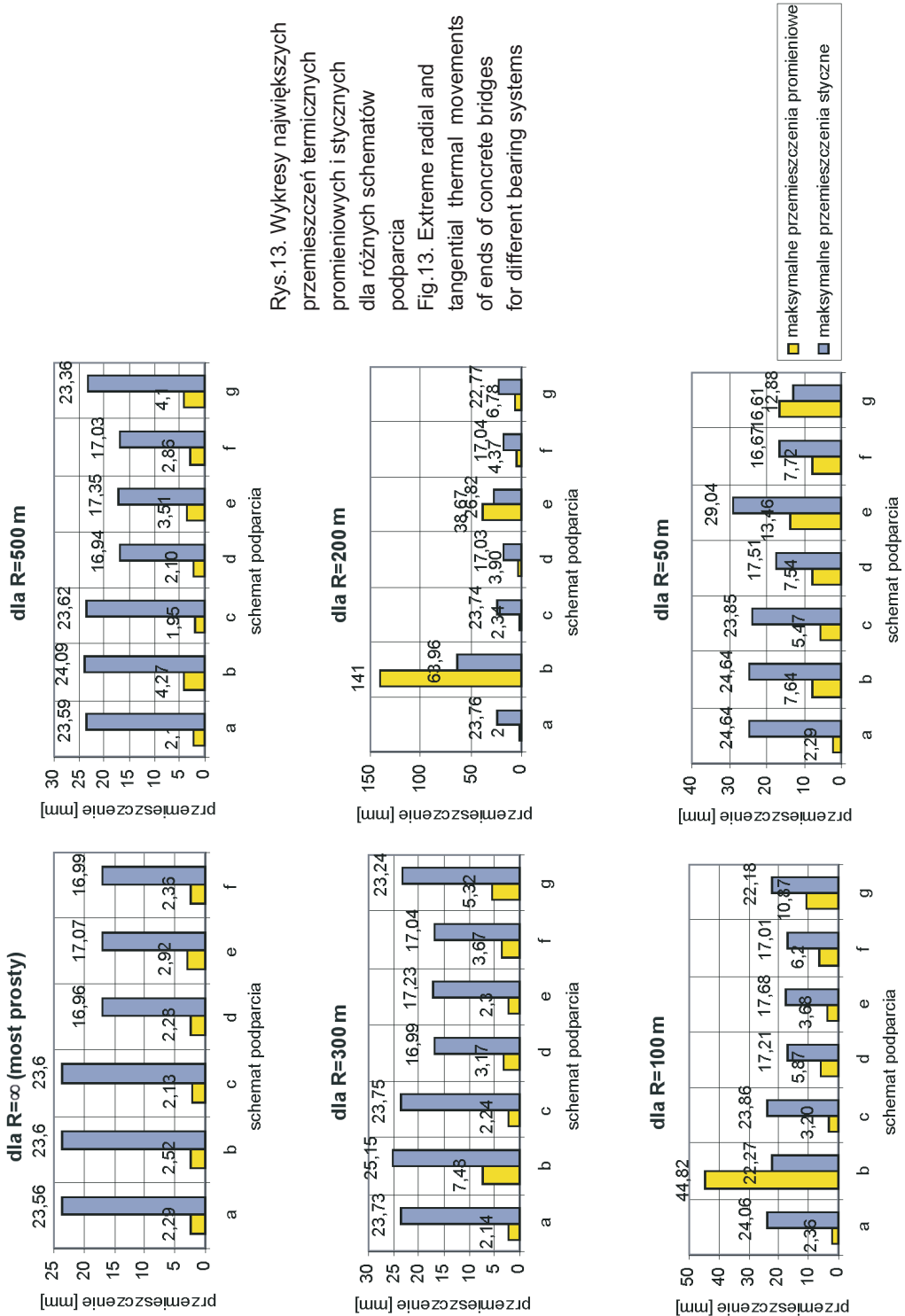
Dla mostów betonowych i stalowych przyjęto 7 schematów podparcia. W schematach „a” ÷ „f” przyjęto łożyska uniemożliwiające przemieszczenia pionowe oraz ograniczające (bądź nie) przemieszczenia wzdłuż promienia mostu zakrzywionego i w kierunku doń prostopadłym w punkcie podparcia. W schemacie „g” dla mostów betonowych i stalowych założono jedno łożysko stałe, a pozostałe łożyska uniemożliwiały (lub nie) przemieszczenia wzdłuż cięciw poprowadzonych z łożyska stałego do punktu podparcia i w kierunku prostopadłym do danej cięciwy. We wszystkich schematach podparcia założone łożyska pozwalały na obroty w dowolnej płaszczyźnie.

Łożysko stałe (uniemożliwiające przemieszczenia liniowe w 3 kierunkach) zlokalizowane było na skrajnej podporze od strony wklęsłej (północnej) łuku mostu (schematy „a”, „b”, „c”, „g”) lub na podporze pośredniej również od strony północnej (schematy „d”, „e”, „f”). Schematy podparcia pokazano na rysunku 3.

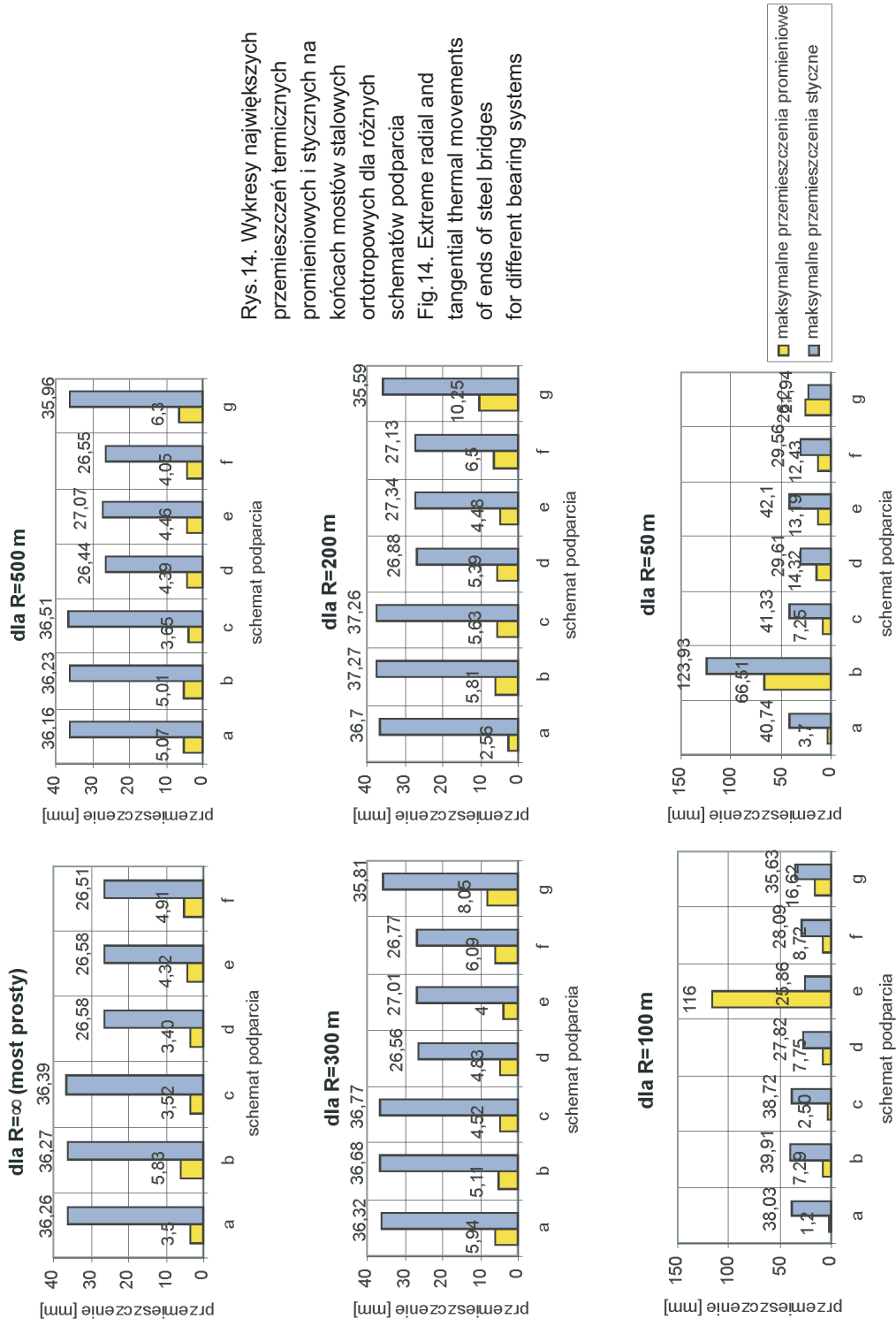
W mostach zespolonych analizowano 6 schematów podparcia („a”, „b”, „c”, „d”, „e” oraz „f”). W schematach „a” ÷ „f” przyjęto łożyska uniemożliwiające przemieszczenia pionowe oraz ograniczające (bądź nie) przemieszczenia wzdłuż promienia mostu zakrzywionego i w kierunku doń prostopadłym w punkcie podparcia. We wszystkich schematach podparcia założone łożyska pozwalały na obroty w dowolnej płaszczyźnie.

W schematach „a” ÷ „c” łożysko stałe, uniemożliwiające przemieszczenia liniowe w 3 kierunkach, usytuowane było na skrajnej podporze na wewnętrznym dźwigarze od strony wklęsłej łuku mostu. W schematach „d” ÷ „f” łożysko stałe przeniesiono na podporę pośrednią tego samego dźwigara. Schematy podparcia pokazano na rysunku 6.

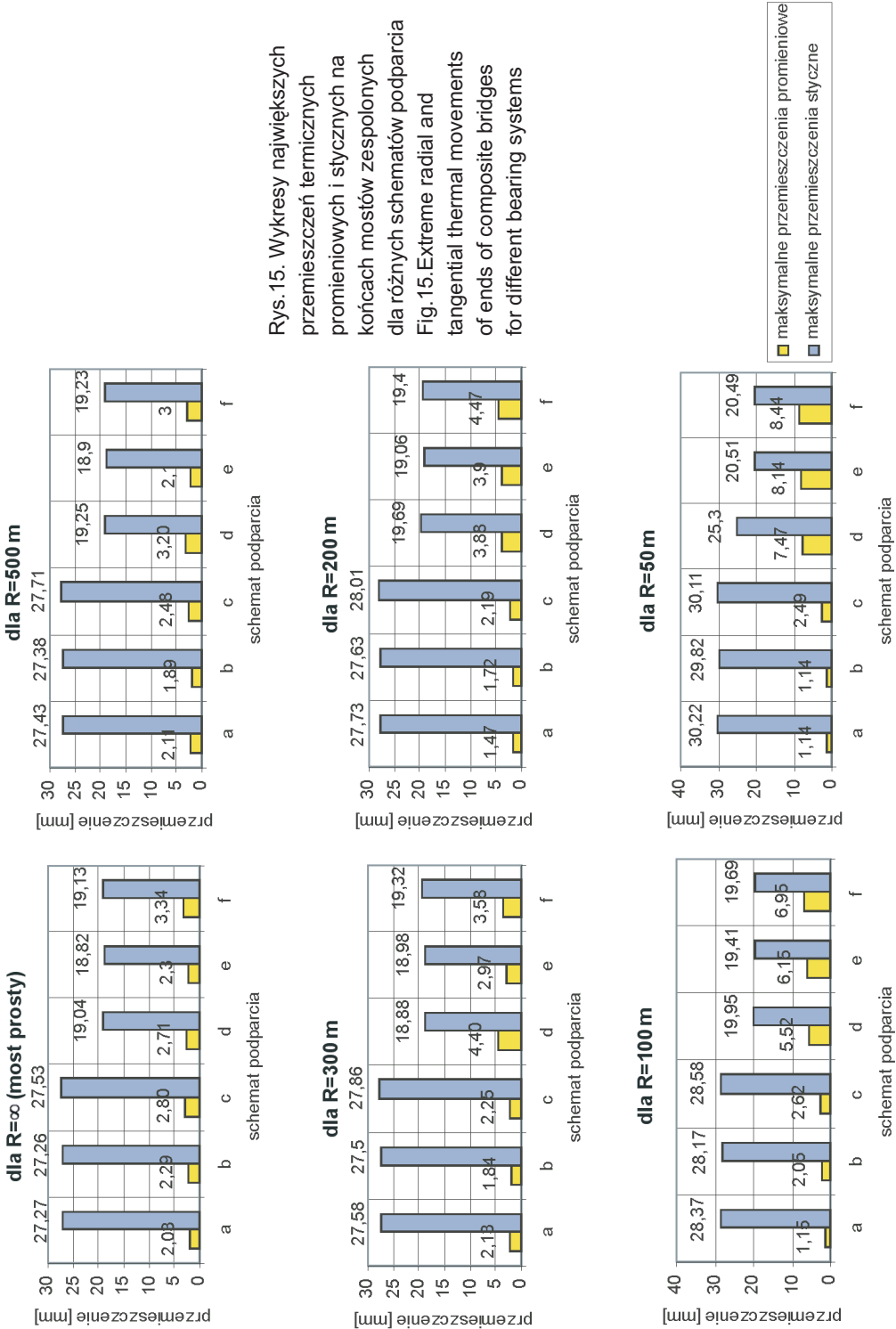
Na rysunkach 13 ÷ 15 przedstawiono odpowiednio przemieszczenia termiczne na końcach mostów betonowych, stalowych i zespolonych dla wymienionych schematów podparcia.



Rys.13. Wykresy największych przemieszczeń termicznych promieniowych i stycznych dla różnych schematów podparcia
 Fig.13. Extreme radial and tangential thermal movements of ends of concrete bridges for different bearing systems



Rys. 14. Wykresy największych przesunięć termicznych promieniowych i stycznych na końcach mostów stalowych ortotropowych dla różnych schematów podparcia
 Fig. 14. Extreme radial and tangential thermal movements of ends of steel bridges for different bearing systems



Rys. 15. Wykresy największych przemieszczeń termicznych promieniowych i stycznych na końcach mostów zespolonych dla różnych schematów podparcia Fig.15. Extreme radial and tangential thermal movements of ends of composite bridges for different bearing systems

Na podstawie analizy rozkładów przemieszczeń termicznych i wykresów największych przemieszczeń termicznych promieniowych i stycznych na końcach mostów dla przyjętych schematów łożyskowania można wyciągnąć następujące wnioski:

- przemieszczenia termiczne promieniowe na końcach mostów są kilkakrotnie mniejsze od przemieszczeń stycznych dla każdego typu mostu i każdego systemu podparcia, przy czym im most jest bardziej zakrzywiony tym te różnice są mniejsze; zatem przemieszczenia styczne mają większe znaczenie przy doborze urządzeń dylatacyjnych,
- wraz ze wzrostem promienia zakrzywienia mostów zakrzywionych w planie przemieszczenia promieniowe przyjmują charakter przemieszczeń poprzecznych do osi mostu, a przemieszczenia styczne charakter przemieszczeń podłużnych,
- dla mostów betonowych:
 - przemieszczenia termiczne promieniowe zachowują zbliżone wartości dla schematów podparcia „a”, „b”, „c” i „g” dla dużych wartości promienia krzywizny mostu ($R = 300$ m, $R = 500$ m), podobną zależność zaobserwowano dla schematów „d”, „e”, „f”,
 - przemieszczenia termiczne styczne osiągają zbliżone wartości dla schematów „a” i „c” oraz „d” i „f” (przy czym te porównywalne wartości są sobie prawie równe dla mostów mało zakrzywionych),
 - nominalnie najmniejsze wartości przemieszczeń stycznych wystąpią dla schematu podparcia „d” dla $R \geq 200$ m, a dla mostów bardziej zakrzywionych dla schematu podparcia „f” (i „g” dla $R = 50$ m),
 - w schemacie łożyskowania „b” i „e” zastosowano jedno łożysko stałe, a pozostałe umożliwiały przesuw w 2 kierunkach: jednym stycznym do osi mostu a drugim doń prostopadłym; przy tych schematach łożyskowania dla dużych wartości promieni zakrzywienia (tj. $R = 300$ m i $R = 500$ m) nie miało to wpływu na rozkład przemieszczeń promieniowych i stycznych w porównaniu z innymi schematami podparcia, ale dla mostów betonowych bardziej zakrzywionych ($R = 200$ m, $R = 100$ m) pojawiły się bardzo duże przemieszczenia promieniowe (szczególnie w schemacie b, w którym łożysko stałe usytuowane było na podporze skrajnej),
- dla mostów stalowych:
 - przemieszczenia termiczne promieniowe zachowują zbliżone wartości dla schematów podparcia „a”, „b”, „c” i „g” dla dużych wartości promienia krzywizny mostu ($R = 200$ m, $R = 300$ m); podobną zależność zaobserwowano dla schematów „d”, „e”, „f”,
 - przemieszczenia styczne są najmniejsze dla schematu podparcia „d” (w którym łożysko stałe umieszczono na podporze pośredniej od strony wklęsłej łuku, a pozostałe łożyska ustawiono tak, że od strony wklęsłej łuku umożliwiały przesuw tylko w kierunku stycznej do osi podłużnej mostu, natomiast od strony wypukłej, cieplejszej, były możliwe także przemieszczenia w kierunku promienia mostu),

- w schemacie łożyskowania „b” i „e” zastosowano jedno łożysko stałe, a pozostałe umożliwiły przesuwę w 2 kierunkach: jednym stycznym do osi mostu a drugim doń prostopadłym; przemieszczenia promieniowe dla $R = 100$ m w schemacie „e” osiągnęły bardzo dużą wartość, zaś dla $R = 50$ m w schemacie „b” przemieszczenia styczne osiągnęły bardzo dużą wartość,
- dla mostów zespolonych:
 - przemieszczenia styczne dla schematów „a”, „b” i „c” oraz „d”, „e” i „f” mają prawie takie same wartości niezależnie od wielkości promienia krzywizny,
 - podobne wartości przyjmują przemieszczenia promieniowe dla badanych mostów zespolonych, ale wraz ze wzrostem zakrzywienia mostów zespolonych przy porównywaniu schematów „a”, „b” i „c” oraz „d”, „e” i „f” można zauważyć, że przemieszczenia styczne maleją a wzrastają przemieszczenia promieniowe,
 - najmniejsze przemieszczenia styczne na końcu mostu wystąpią w schemacie „e” (który jest podobny do schematu „d” dla mostów stalowych),
- przestawienie łożyska stałego z podpory skrajnej na pośrednią zmniejsza przemieszczenia styczne, niezależnie od typu mostu (jest to szczególnie widoczne dla mostów mniej zakrzywionych),
- w schemacie łożyskowania „g” dla mostów betonowych i stalowych, w którym było jedno łożysko stałe, a pozostałe były przesuwne w dwóch kierunkach: jednym wzdłuż cięciwy poprowadzonej od łożyska stałego do danego punktu podparcia i drugim doń prostopadłym, zaobserwowano, że przemieszczenia styczne maleją przy wzroście zakrzywienia mostu; generalnie jednak można stwierdzić, że w schemacie łożyskowania „g” wartości przemieszczeń promieniowych i stycznych nieznacznie odbiegają od wartości tych przemieszczeń dla innych schematów łożyskowania; zatem powstaje pytanie: czy warto stosować tak skomplikowany, ze względów montażowych, system łożyskowania?

3. UWAGI O ROZMIESZCZANIU ŁOŻYSK W MOSTACH ZAKRZYWIONYCH W PLANIE

Zagadnienia dotyczące rozmieszczania łożysk były przedmiotem stosunkowo wielu opracowań. W pracach [16] i [17] przedstawiono wskazówki dotyczące wyboru systemu podparcia konstrukcji oraz liczne przykłady systemów podparć różnych typów konstrukcji mostowych. Przeciwdziałaniu powstawania uszkodzeń powinny służyć zasady wyboru systemu łożyskowania podane w [1] oraz poniższe dotyczące konstrukcji mostowej zakrzywionej w planie:

- Uwarunkowania geometryczne i kinematyczne konstrukcji powinny być uwzględniane przy doborze systemu łożyskowania. Przykładowo łożyska wałkowe i wahaczowe nie powinny być stosowane w mostach zakrzywionych w planie, w mostach z małą szywnością skrętną.

- Przemieszczenia łożysk w mostach betonowych sprężonych zakrzywionych w planie zależą od wielkości sprężenia i rosną w czasie z powodu skurczu i pęcznienia. Natomiast kierunki przemieszczeń zależą od lokalizacji łożyska stałego i rozmieszczenia sprężających prętów zbrojeniowych.
- W przypadku mostów zakrzywionych w planie najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie łożysk umożliwiających obrót i przesuw w dowolnym kierunku. Dobierając łożyska w tych mostach należy szczególną uwagę zwrócić na takie parametry jak szerokość mostu oraz promień zakrzywienia.
- W mostach zakrzywionych w planie, z uwagi na konieczność przeniesienia sił odśrodkowych, prostopadłych do osi dźwigara należy przyjmować zasadę, aby wszystkie łożyska pod dźwigarem wewnętrznym były nieprzesuwne w tym kierunku, za to łożyska pod dźwigarem zewnętrznym powinny taki przesuw umożliwiać.

Dzięki przestrzeganiu wymienionych zasad można w miarę skutecznie przewidywać i kontrolować wielkości oraz kierunki odkształceń termicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Zobel H., Kruk M., Sobala D.*: Łożyskowanie mostów w skosie. *Drogi i Mosty*, 4/2004
- [2] EN 1991 - 1.5 wraz z Załącznikiem Krajowym „Oddziaływania termiczne w konstrukcjach”
- [3] PN-EN 1337 – części 1, 9 i 11: „Łożyska konstrukcyjne”
- [4] *Zobel H.*: Naturalne zjawiska termiczne w mostach. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 231, Warszawa 2003
- [5] *Zobel H., Sobala D.*: Naturalne oddziaływania termiczne na obiekty mostowe w polskich warunkach klimatycznych. *Inżynieria i Budownictwo*, 9/2004, 497-501
- [6] *Moorty S., Roeder C.W.*: Temperature-Dependent Bridge Movements. *Journal of Structural Engineering*, **118**, April 1992, 1090-1105
- [7] *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
- [8] *Roeder C.W.*: Proposed design method for thermal bridge movement. *Journal of Bridge Engineering*, January/February 2003, 12-19
- [9] *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
- [10] *Roeder C.W.*: Thermal Movement Design Procedures for Steel Bridges. Report to American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., 1997

- [11] *Roeder C.W., Moorthy S.*: Thermal Movements in Bridges. Report for NSF, January 1991
- [12] *Kruk M.*: Wpływ ukształtowania konstrukcji mostowej na sposób jej łożyskowania. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2004
- [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] ANSYS - Engineering Analysis System. SAS Inc, USA
- [15] *Sobala D.*: Wpływ wybranych czynników meteorologicznych na odkształcenia przęseł mostów stalowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2002
- [16] *Eggert H., Grote J., Kauschke W.*: Lager im Bauwesen. Ernst & Sohn, Berlin – Munchen – Düsseldorf 1974
- [17] *Eggert H., Kauschke W.*: Structural Bearings. Ernst & Sohn, Berlin 2002

BEARING SYSTEMS FOR CURVED IN PLANE BRIDGES

Abstract

The paper presents the second part of the research on thermal movements of bridges published in "Drogi i Mosty", no. 4/2004. Using numerical methods the thermal movement distribution in curved bridges was determined for different bearing systems. The numerical analysis was performed for three types of bridges 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 and thermal movement distribution in selected bridges was calculated using ANSYS. An influence of radius of bridge curvature in curved bridges on distribution of thermal movements for different bearing systems was analysed.