

Tadeusz GARGULA¹
Pelagia GAWRONEK²
Maria MAKUCH³

PRACE PROJEKTOWE PRZY ZAKŁADANIU SIECI KONTROLNEJ DLA CELÓW BADANIA STABILNOŚCI MOSTU KOLEJOWEGO Z WYKORZYSTANIEM IDEI SIECI MODULARNYCH

Sieć kontrolna służąca badaniu stabilności mostu kolejowego została zaprojektowana z uwzględnieniem podstawowych aspektów technicznych: stabilności podłoża, odpowiedniej lokalizacji punktów oraz warunków geometrycznych, jakie powinna spełniać osnowa do wyznaczania przemieszczeń. Liczbowe parametry projektowe zakładanej sieci to m.in. błąd położenia punktu oraz wskaźniki wyznaczalności oraz niezawodności globalnej. Pomiar sieci wykonany został klasycznymi technikami naziemnymi na bazie stanowisk centrowanych. W celu poprawy parametrów jakości technicznej sieci, zaproponowano wprowadzenie dodatkowych quasi-observacji kąto-liniowych na bazie stanowisk swobodnych (bez centrowania). Kolejną propozycją było wykorzystanie idei sieci modularnych do wyznaczenia położenia punktów sieci kontrolnej. Prace obliczeniowe polegały m.in. na przeprowadzeniu wstępnej analizy dokładności oraz badaniu stabilności punktów osnowy.

Słowa kluczowe: przemieszczenia, stabilizacja osnowy, układ odniesienia, niezawodność

1. Wprowadzenie

Potrzeba prowadzenia badań w zakresie stabilności stalowych mostów kolejowych wynika z zaawansowanego wieku znacznej części tego typu obiektów, co często wiąże się kończącym się okresem ich żywotności eksploatacyjnej. Najliczniejszą reprezentację mostów kolejowych, występujących na liniach PKP PLK S.A., stanowią stalowe mosty kratownicowe, pochodzące głównie z lat 50. oraz 60. ubiegłego stulecia. Zaprojektowane zgodnie z przepisami branżowymi na okres 100 lat

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Tadeusz Gargula, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji; Katedra Geodezji; tadeusz.gargula@urk.edu.pl

² Pelagia Gawronek, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji; Katedra Geodezji; p.gawronek@ur.krakow.pl

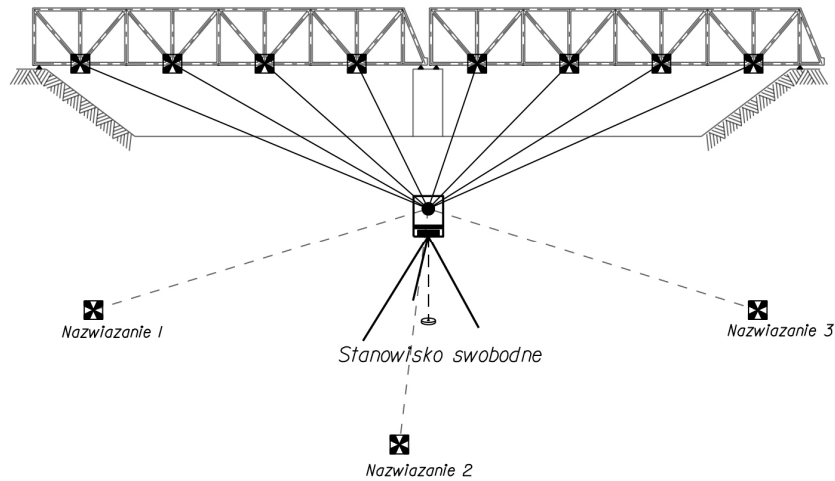
³ Maria Makuch, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji; Katedra Geodezji; m.makuch@ur.krakow.pl

użytkowania, zazwyczaj objęte są zgrubnym nadzorem, co nie pozwala uniknąć awarii i katastrof spowodowanych niewystarczającą oceną stanu ich wyeksploatowania. Zgodnie z zaleceniami związków kolejowych państw Europy Zachodniej [22], wiekowe mosty kolejowe, zaprojektowane na warunki eksploatacyjne ubiegłego wieku powinny podlegać weryfikacji stanu konstrukcji w celu oceny dalszej przydatności eksploatacyjnej. Efektywna diagnostyka stanu konstrukcji mostowych stanowi jednak złożone zagadnienie, wymagające stosowania rozwiązań z zakresu metrologii, materiałoznawstwa, fizyki, chemii czy też biologii.

Zgodnie z Ogólnymi Specyfikacjami Technicznymi Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych [14] stosowane w mostownictwie metody geodezyjne (klasyczne, fotogrametryczne i satelitarne) służą nie tylko do pomiaru przemieszczeń i odkształceń, lecz także pozwalają na przestrzenną kontrolę ukształtowania obiektu oraz jego komponentów. Geodezyjne badania stabilności mostów kolejowych stanowią podstawowe narzędzie w diagnostyce obiektów infrastruktury szynowej [1,2]. System kontroli stanu technicznego mostów kolejowych w Polsce składa się z okresowych przeglądów technicznych konstrukcji realizowanych przez służby utrzymania linii kolejowych - ich zadaniem jest wizualna ocena obiektu. Oprócz tego, obiekty mostowe podlegają (co 5÷10 lat) przeglądom rozszerzonym, prowadzonym odpowiednio przez inspektorów mostowych bądź zespoły diagnostów mostowych. Normy branżowe przewidują również przeglądy specjalne, prowadzone przez certyfikowane jednostki naukowo-badawcze [18].

Klasyczne, geodezyjne metody badania stabilności obiektów mostowych prowadzone są każdorazowo, gdy zachodzi potrzeba wyznaczenia wielkości i tendencji określonego typu uszkodzenia. Zmiany położenia oraz deformacje, przejawiające się w nieprawidłowym usytuowaniu obiektów, nadmiernym przemieszczeniu liniowym, nadmiernym obrocie, w zmianie geometrii elementów obiektu, ugięciu bądź przemieszczeniu pionowym spowodowanym dynamicznymi i statycznymi obciążeniami, stanowią podstawę badań geodezyjnych.

Zadanie badania stabilności każdej konstrukcji inżynierskiej polega na wykonywaniu powtarzanych okresowo pomiarów i obliczeń w sieci kontrolnej, służących ocenie stabilności punktów odniesienia i uzyskaniu wektorów przemieszczeń punktów kontrolowanych obiektu wraz z charakterystyką ich dokładności [28]. W pomiarach przemieszczeń i odkształceń elementarną podstawę realizowanych badań stanowi układ odniesienia, definiowany poprzez bazę oraz układ współrzędnych. Realizację układu odniesienia zapewnia sieć kontrolna, czyli sieć punktów osnowy sytuacyjno-wysokościowej, zaprojektowana i zastabilizowana trwale na potrzeby okresowych obserwacji obiektu. Obserwowane punkty obiektu mogą stanowić elementy naturalne konstrukcji bądź zaznaczone na niej znaki, ułatwiające identyfikację w kolejnych pomiarach okresowych [16]. Sytuacyjno-wysokościowy pomiar geodezyjny elementów konstrukcji mostu może zostać przeprowadzony z zastosowaniem metody wcięcia przestrzennego w przód lub przy wykorzystaniu pojedynczych stanowisk swobodnych (Rys. 1). Odpowiednie nawiązanie dla takich pomiarów zapewniają wcześniej wyznaczone punkty sieci kontrolnej.

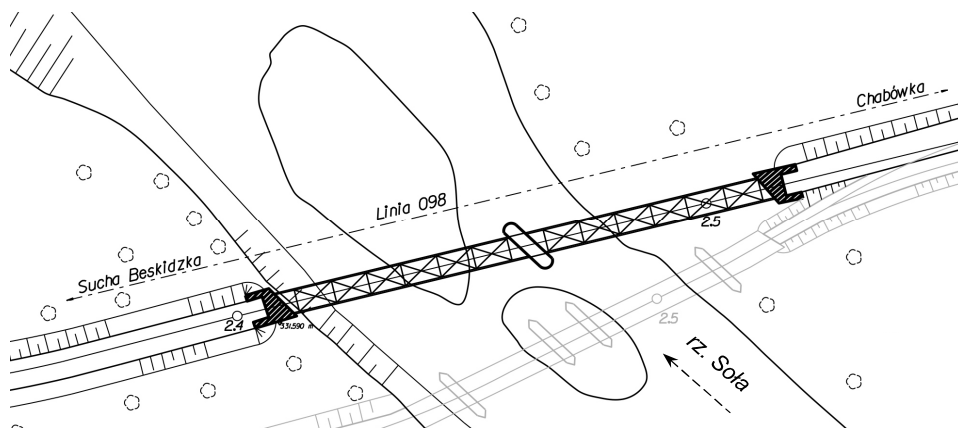


Rys. 1. Sytuacyjno-wysokościowy pomiar geodezyjny obiektu mostowego (na podstawie: [16])

Fig. 1. Horizontal and height measurement of the bridge object (based on: [16])

2. Obiekt badawczy

Obiekt badań stanowi stalowy most kolejowy w kilometrażu (km) 2.485 linii kolejowej nr 098 Sucha Beskidzka - Chabówka, udostępniony przez PKP PLK S.A. Zakład Linii Kolejowych w Nowym Sączu [13]. Przedmiotowy most zbudowano w latach 60-tych ubiegłego stulecia podczas modernizacji trasy kolejowej nad korytem rzeki Skawy (Rys. 2).



Rys. 2. Plan sytuacyjny obiektu badawczego (na podstawie: [13])

Fig. 2. Site plan of the research object (based on: [13])

Konstrukcję mostu kolejowego tworzy dwuprzęsłowy, ciągły ustrój nośny o rozpiętości teoretycznej przęseł wynoszącej 105,4 m. Konstrukcja posadowiona jest na betonowych, ukośnych przyczółkach i filarze. Dla płynności przemieszczeń ciągłego ustroju nośnego mostu na podporach, zastosowano zespół łożysk przegubowych przesuwnych oraz nieprzesuwnych. Oś podłużna mostu przecina oś przeskody pod kątem 55° . Całkowita szerokość mostu kolejowego wynosi 5,4 m. Przez obiekt prowadzą pojedyncze tory o rozstawie 4,5 m. Most kolejowy w km 2.485 trasy Sucha Beskidzka - Chabówka stanowi reprezentację najliczniejszej grupy pomostów transportu szynowego.

Przez wieloletni okres eksploatacji diagnostyka mostu kolejowego sprowadzała się jedynie do przeprowadzania okresowych oględzin, oceniających ogólną kondycję konstrukcji. Teoretyczne parametry statyczne ponad 50-letniego obiektu nadal obowiązują, mimo iż w ostatnich dekadach nastąpiła rewolucja w transporcie szynowym (m.in. znaczny wzrost prędkości), co powinno spowodować zmianę warunków eksploatacji infrastruktury. Zgodnie z treścią raportów ORE D154/R4 (1985) oraz ERRI D181/DT 329 (1995), opublikowanych przez zarządców linii kolejowych Europy Zachodniej przy udziale Instytutu Badawczego Dróg i Mostów w Warszawie (zob. [22]), pomosty szynowe, z uwagi na zmęczenie eksploatacyjne konstrukcji oraz nowe warunki techniczne transportu, winny być poddawane ponownej ocenie nośności, co w konsekwencji sprowadzać się powinno do opracowania ewentualnego planu ich modernizacji. Część żądanych parametrów eksploatacyjnych możliwa jest do wyznaczenia na podstawie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń i odkształceń.

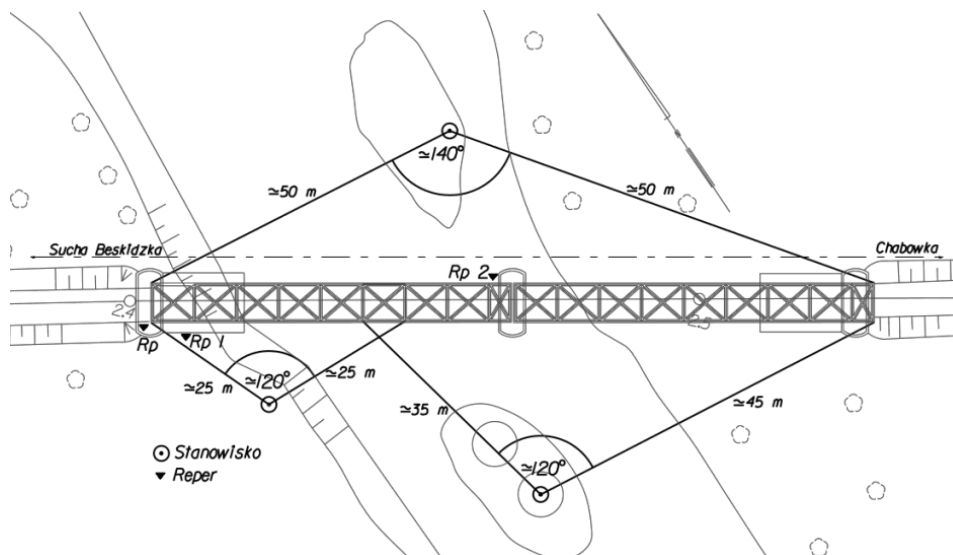
3. Projekt i stabilizacja punktów osnowy kontrolnej

Pojęcia układu odniesienia ma fundamentalne znaczenie przy geodezyjnym wyznaczaniu przemieszczeń. Od układu odniesienia należy oczekiwać, iż będzie on stabilny w czasie lub że może być matematycznie przekształcone do układu stabilnego na określonej epokę [23]. Powszechnie obowiązujące treści normalizacji wskazują, iż w sytuacji wymagającej wyznaczenia przemieszczeń o charakterze bezwzględny, do zakresu pomiarów odkształceń należy włączyć określenie układów odniesienia, a w szczególności identyfikację stałych punktów [26]. Zgodnie z treścią kolejowej instrukcji geodezyjnej [15], pomiary związane z badaniem przemieszczeń i odkształceń obiektu należy opierać na założonej do tych celów osnowie. Układ odniesienia, stanowiący zbiór punktów w przestrzeni, koniecznych w monitorowaniu ruchu obiektu, powinien być realizowany poprzez bazę odniesienia oraz układ współrzędnych [28]. Bazę odniesienia stanowią zastabilizowane w terenie punkty sieci kontrolnej, układ współrzędnych jest natomiast funkcyjnym zapisem zarówno ich pozycji i charakterystyk dokładnościowych, jak i wektorów przemieszczeń [3].

W badanym przypadku podstawowe kryteria zakładanej osnowy stanowiły: dokładność, niezawodność oraz stabilność. Parametry osnowy powinny zapewnić

uzyskanie wymaganych, szczegółowych tolerancji wymiarowych oraz dokładności wyznaczanych zmian geometrycznych obiektu, które wynikają z treści normy PN-S-10050:1989 [27] oraz branżowych wytycznych technicznych [30]. Kolejnym ważnym czynnikiem brany pod uwagę przy projektowaniu sieci był czas trwania pomiaru okresowego (np. minimalizacja czynności przygotowawczych na stanowisku pomiarowym) – ustalone procedury pomiarowe powinny zapewniać uzyskanie obiektywnych wyników, tzn. bez zakłóceń spowodowanych np. przejazdem pociągu. Warunkiem poprawnego projektu sieci kontrolnej było opracowanie i uwzględnienie całej koncepcji pomiaru mostu kolejowego (danej kampanii pomiarowej). Lokalizacja stanowisk pomiarowych (przykład: na rys. 3) stanowiła konsekwencję optymalizacji procesu pozyskiwania danych przestrzennych całego obiektu, wynikającą z parametrów technicznych zastosowanych instrumentów geodezyjnych, specyfiki warunków terenowych, monitorowanego obiektu oraz czasu trwania pomiaru. Przyjęto w tym zakresie m.in. następujące założenia:

- w trakcie trwania pomiaru okresowego, nad wszystkimi punktami sieci kontrolnej jednokrotnie zostaną spoziomowane i precyzyjnie scentrowane spodarki na statywach, co pozwoli na zminimalizowanie błędów centrowania;
- pomiar okresowy obiektu, podlegający rygorowi czasowemu realizacji w terenie, wykonywany będzie z pojedynczych stanowisk zlokalizowanych bezpośrednio nad punktami sieci kontrolnej lub stanowiących stanowiska swobodne (Rys. 3);
- podstawowym warunkiem wiarygodności wyników w badaniach okresowych obiektu z zastosowaniem metody biegunowej będzie staranna stabilizacja punktu stanowiska [25];



Rys. 3. Koncepcja rozmieszczenia stanowisk oraz punktów kontrolowanych (na podstawie: [13])

Fig. 3. Conception of placement both the stations and the points controlled (based on: [13])

- każde ze stanowisk obserwacyjnych zostanie nawiązane do jak największej (możliwej) liczby punktów sieci kontrolnej (por. Rys. 2);
- wysokości punktów zamarkowanych na obiekcie będą wyznaczone metodą niwelacji trygonometrycznej, w oparciu o dwa repery znajdujące się na terenie obiektu.

Sieć kontrolna, służąca badaniu stabilności mostu kolejowego została zaprojektowana z uwzględnieniem podstawowych aspektów technicznych: stabilności podłoża, lokalizacji punktów, możliwości stabilizacji oraz warunków geometrycznych, jakie powinna spełniać osnowa do badania przemieszczeń. Podczas tworzenia projektu sieci kontrolnej dążono do lokalizacji punktów w możliwie znacznym oddaleniu od krawędzi obiektu oraz od przebiegu przeszkody (rzeki Skawy), celem minimalizacji wpływu pracy konstrukcji mostu oraz mechaniki gruntów wokół cieku wodnego na stabilność elementów sieci.

Jakość geometryczna sieci kontrolnej może być zapewniona poprzez wysoki, globalny wskaźnik niezawodności, stanowiący parametr nadwymiarowości względnej sieci (procentowy stosunek elementów nadliczbowych, liniowo niezależnych, do ilości wszystkich obserwacji). W przypadku, gdyby globalny wskaźnik niezawodności równy był w przybliżeniu 50%, wówczas każda obserwacja w sieci (w sensie przeciętnym) byłaby niezależnie kontrolowana [20].

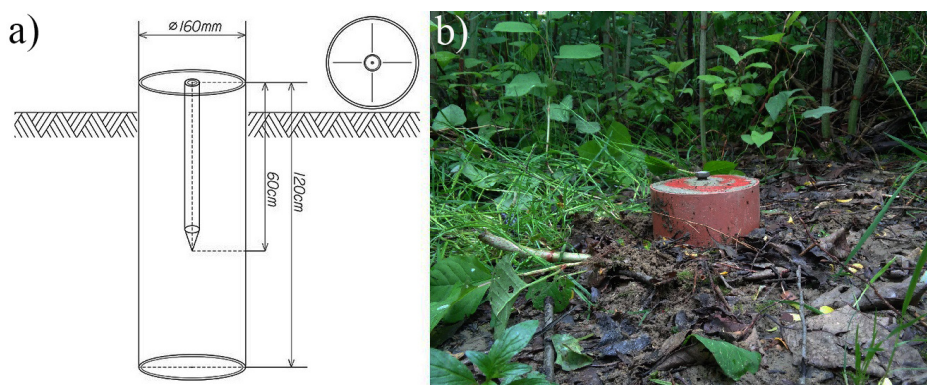
Efektom prac projektowych, zmierzających do utworzenia układu odniesienia spełniającego wszelkie aspekty techniczne oraz umożliwiającego przeprowadzenie pomiarów okresowych, stał się wyjściowy projekt sytuacyjno-wysokościowej sieci kontrolnej pokazany na rysunku 4. Projekt ten będzie następnie weryfikowany (w zakresie procedury pomiaru) na podstawie testów numerycznych (wstępnych analiz dokładności).

Punkty sieci kontrolnej, służącej badaniu przemieszczeń konstrukcji inżynierskich, powinny być stabilizowane w sposób możliwie trwałe, zapewniający ograniczenie wpływu błędów na stanowisku na wyniki pomiarów okresowych. Zalecanym sposobem stabilizacji osnów są słupy betonowe z urządzeniami służącymi wymuszonemu centrowaniu instrumentów geodezyjnych [2; 24]. Taki sposób stabilizacji punktów sieci kontrolnej jest jednak czasochłonny oraz kosztowny. Osadzenie betonowych filarów obserwacyjnych wymagałoby co najmniej kilku-miesięcznych pomiarów kontrolnych montażu kolumn [4]. Poza tym, w sytuacji badania stabilności przedmiotowego obiektu, naruszałoby to zapisy prawa do dysponowania terenem poprzez sposób umieszczania znaków. Ze względu na ograniczony czas realizacji badań terenowych, przeprowadzono podziemną lokalizację znaków punktów sieci (Rys. 5). Trwała stabilizacja punktów polegała (w badanym przypadku) na posadowieniu w gruncie słupów betonowych o długości 120 cm oraz średnicy 160 mm, z osadzonymi w masie betonowej centrami z metalu nierdzewnego. Usytuowanie słupów betonowych następowało bezpośrednio po przygotowaniu pod stabilizację wykopu, wyścielonego utwardzającą oraz tłumiącą drgania podsypką (mieszanka tłuczni, żwiru i gleby).



Rys. 4. Projekt sieci kontrolnej (podkład projektu na podstawie: [31])

Fig. 4. Control network design (based on: [31])



Rys. 5. Stabilizacja punktów sieci kontrolnej: a) schemat; b) widok z boku

Fig. 5. Marking of control network points: a) schema; b) side view

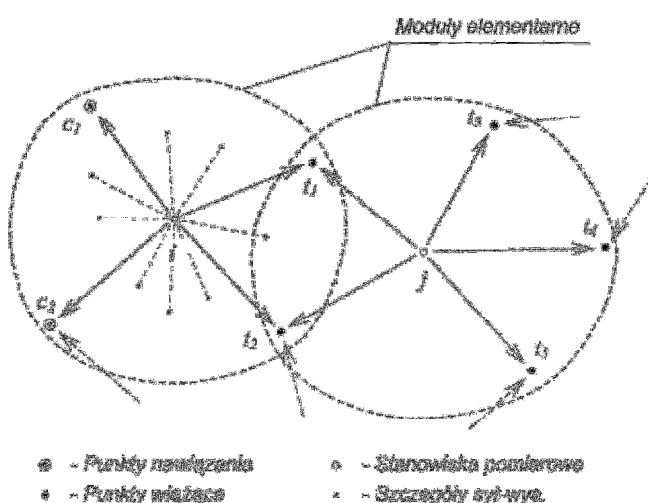
4. Idea sieci modułarnych

Badania testowe zostaną przeprowadzone dla zaprojektowanej sieci (Rys. 4) oraz kilku wariantów porównawczych, w których wykorzystano elementy konstrukcyjne tzw. sieci modułarnych [17]. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę oraz genezę tej metody pomiarów geodezyjnych - por. [12].

Wykorzystanie idei sieci modułarnych prowadzi do uproszczenia i skrócenia czasu prac pomiarowych. Zalety takiego rozwiązania wynikają z podstawowych

własności sieci modularnych: 1) stanowiska są dowolnie wybierane – bez markowania (brak czynności centrowania instrumentu i błędów z tym związanych); 2) punkty wiążące są z założenia punktami celu – ich rolę mogą pełnić punkty szczegółów sytuacyjnych I grupy dokładnościowej o wyraźnym kształcie (możliwość jednoznacznej identyfikacji punktu); 3) osnowa podlega pomiarowi jednocześnie z pomiarem szczegółów terenowych [8].

Opracowanie numeryczne sieci modularnej sprowadza się do rozwiązania układu równań warunkowych z niewiadomymi (zestawionych dla punktów wiążących i punktów nawiazania – zob. Rys. 6), co pozwala na wyznaczenie parametrów niezbędnych do transformacji wielogrupowej.



Rys. 6. Fragment przykładowej sieci modularnej (na podstawie: [12])

Fig. 6. An example fragment of modular network (based on: [12])

Koncepcja zastosowania sieci modularnych wywodzi się z badań prowadzonych w Niemczech w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [29]. Konstrukcjami pomiarowymi o podobnej strukturze zajmował się również Kadaj [19]. Sieci modularne mogą być stosowane jako konstrukcje płaskie (sieci powierzchniowe) [7] lub konstrukcje o charakterze liniowym (ciągi modularne) [5]. Część prac naukowych autora dotyczy możliwości zintegrowania tego typu konstrukcji z sieciami wektorowymi GPS [10; 11]. Prowadzone były również badania nad wykorzystaniem sieci modularnych w badaniu przemieszczeń, np. jako tzw. sieci kinematycznych [9].

Niektóre cechy sieci modularnych można wykorzystać w tych dziedzinach pomiarów geodezyjnych, w których istnieje potrzeba osiągnięcia wysokiej precyzji wyznaczeń. Zastosowanie stanowisk pośrednich (tzw. punktów „straconych”) jest łatwym sposobem polepszenia wartości technicznej konstrukcji geodezyjnej [6]. Wystarczy bowiem w sposób dowolny, ale korzystny ze względu na wzajem-

ne wizury, obrać stanowisko do pomiarów kierunkowych (lub biegunowych). Otrzymany pęk kierunków (tzw. quasi-observacja) nie tylko wyznacza położenie samego stanowiska, ale również wpływa na lokalne wzmocnienie sieci; ponadto eliminują się błędy centrowania instrumentu. Z powyższego wynika, że elementy sieci modularnych (czyli quasi-observacje kąto-liniowe lub kątowe) mogą w prosty sposób służyć polepszeniu wartości technicznej sieci realizacyjnych lub kontrolnych do pomiaru przemieszczeń.

5. Wstępne analizy dokładności

Jednym z etapów poprawnie przeprowadzonego procesu projektowania osnowy powinna być wstępna analiza dokładności [21]. Wyniki takiej analizy dają podstawę do oceny poprawności projektu sieci oraz ewentualnej modyfikacji jej konstrukcji lub korekty założonej a priori dokładności pomiaru. Zadanie to można zrealizować, przykładowo, przy użyciu jednego modułów systemu obliczeniowego *GeoNet* [21]. Program nie wymaga podawania rzeczywistych miar obserwacji; deklaruje się jedynie plany obserwacji i współrzędne przybliżone. Analiza ta pozwala określić docelowy model dokładności sieci, do którego powinny zmierzać wyniki wyrównania.

Pierwszym krokiem w zadaniu wstępnej analizy dokładności poziomej sieci geodezyjnej jest oszacowanie możliwie realnych wartości błędów średnich obserwacji (w badanym przypadku – kierunków i długości). Zauważyć tutaj należy, że faktyczną dokładność pomiarów (zarówno kątowych jak i liniowych) kształtują głównie błędy centrowania instrumentu i sygnału (lustra) oraz błędy identyfikacji punktów; natomiast mniejsze znaczenie ma sama dokładność przyrządu – tachimetru elektronicznego (por. [21]).

Zakładając, że błąd centrowania instrumentu wynosi $m_{ci} \approx \pm 4$ mm (łącznie z błędem identyfikacji punktu), możemy dla danej długości odcinka (np. $d = 100$ m) obliczyć popełniany z tego tytułu błąd kierunku:

$$\delta_i = \arctg \frac{m_{ci}}{d} \cong \pm 25^{\text{cc}} \quad (1)$$

Podobną wartość błędu kierunku ($\delta_s = \pm 25^{\text{cc}}$) uzyskamy z tytułu błędu centrowania sygnału ($m_{cs} \approx \pm 4$ mm). Przyjmując błąd pomiaru kierunku tachimetrem precyzyjnym (np. Leica TC2003) na poziomie $\delta_t = \pm 2^{\text{cc}}$, obliczymy sumaryczny błąd kierunku dla pomiaru na stanowisku centrowanym (nad punktem stabilizowanym):

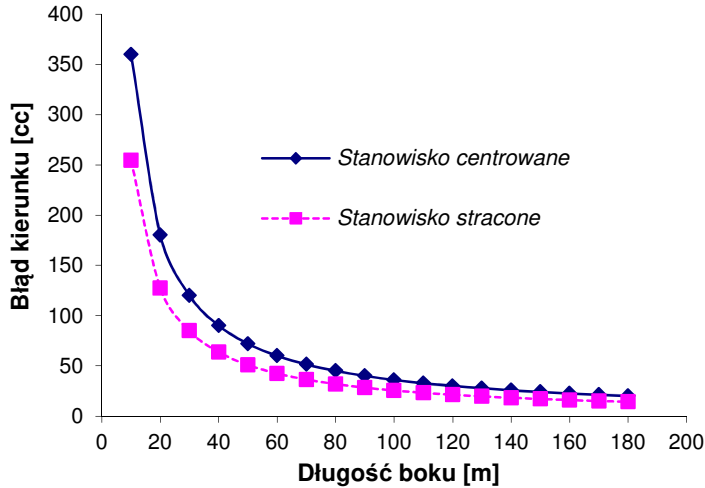
$$m_k = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_t^2 + \delta_s^2} \cong 36^{\text{cc}} \quad (2)$$

W przypadku pomiaru na stanowisku niecentrowanym (bez stabilizacji), błąd kierunku będzie wolny od błędu centrowania instrumentu:

$$m_{k'} = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_s^2} \cong 26^{\text{cc}} \quad (3)$$

Na podstawie wzorów (1 ÷ 3) szacowano błędy kierunków dla poszczególnych długości celowych występujących w badanej sieci kontrolnej.

Na rysunku 7 pokazano wpływ długości celowej na wartość błędu kierunku: dla pomiaru klasycznego (stanowiska centrowane) oraz dla sieci modułowych (bez centrowania).



Rys. 7. Wpływ długości celowej na błąd średni pomiaru kierunku

Fig. 7. Impact of sight line length on mean error of direction measurement

Natomiast błąd pomiaru długości (m_d) oszacujemy w następujący sposób (przyjmujemy błąd dalmierza $m_D \approx \pm 1$ mm – dla długości rzędu 100 m):

$$m_d = \sqrt{m_{ci}^2 + m_D^2 + m_{cs}^2} \cong 6 \text{ mm} \quad (4)$$

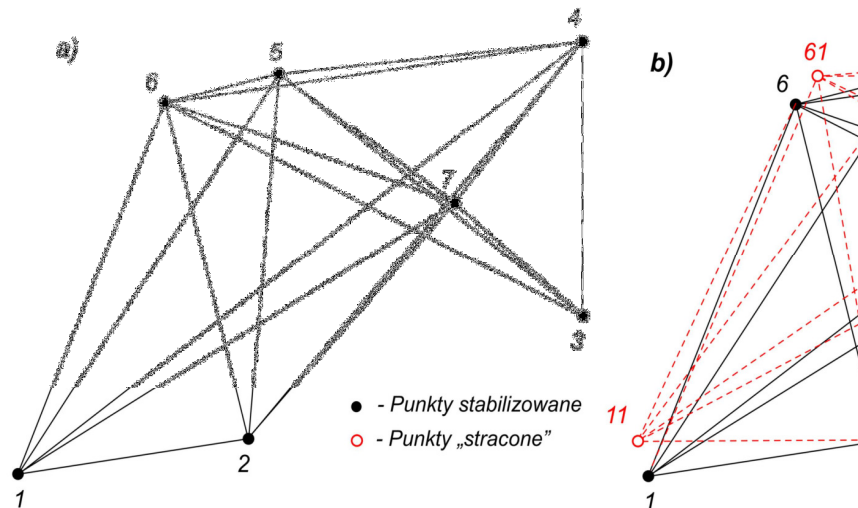
W przypadku braku błędu centrowania instrumentu ($m_{ci} = 0$), błąd długości wyniesie:

$$m_{d'} = \sqrt{m_D^2 + m_{cs}^2} \cong 4 \text{ mm} \quad (5)$$

Wstępne analizy dokładności dla czterech wariantów testowych sieci kontrolnej (Rys. 4) przeprowadzono przy pomocy jednego z modułów systemu obliczeniowego *GeoNet*. Dla zweryfikowania poprawności projektu wyjściowego sieci zaproponowano kilka opcjonalnych wariantów układów obserwacyjnych (porównawczych), na podstawie których również można wyznaczyć (w przyjętym układzie odniesienia) położenie poziome punktów 1 – 7 (Rys. 4):

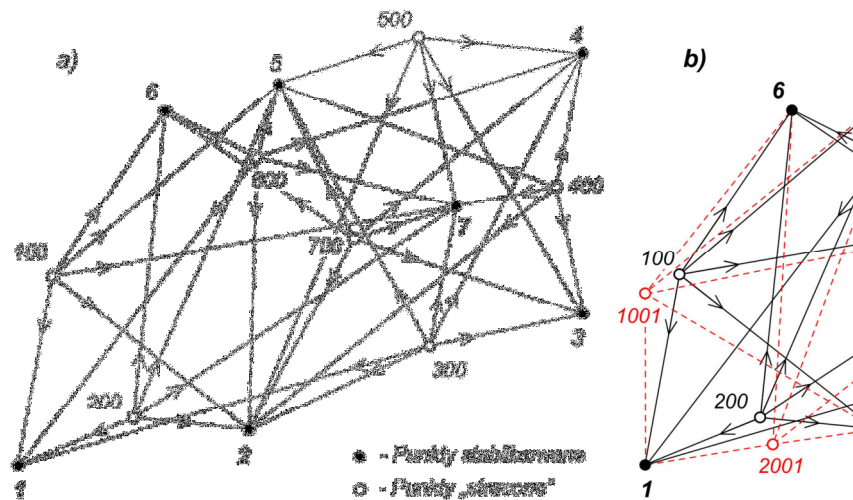
- wariant „KL”: Sieć klasyczna (Rys. 8a) – pomiar na bazie stanowisk centrowanych;
- wariant „KL+Q”: Sieć klasyczna uzupełniona tzw. quasi-obszernymi (Rys. 8b);

- wariant „MOD”: Sieć modułowa (Rys. 9a) – pomiar na bazie stanowisk „straconych” (niecentrowanych). Przyjęto założenie, że łączna liczba kierunków wyznaczających punkty sieci będzie taka sama jak w przypadku wariantu KL (zob. Rys. 8a);
- wariant „MOD+Q”: Sieć modułowa uzupełniona pomiarem na dodatkowych stanowiskach niecentrowanych (Rys. 9b).



Rys. 8. Szkic poglądowy sieci kontrolnej: a) wariant KL; b) wariant KL+Q (przykładowy fragment: zasada tworzenia quasi-observacji)

Fig. 8. A visual sketch of the control network: a) variant KL; B) variant KL + Q (exemplary part: principle of quasi-observation)



Rys. 9. Szkic poglądowy sieci kontrolnej: a) wariant MOD; b) wariant MOD+Q (przykładowy fragment: zasada tworzenia quasi-observacji)

Fig. 9. A visual sketch of the control network: a) variant MOD; B) variant MOD + Q (exemplary part: principle of quasi-observation)

Położenie sytuacyjne punktów sieci kontrolnej identyfikował lokalny układ współrzędnych, którego oś Oy dostosowano do konstrukcji obiektu. Jako początek układu współrzędnych obrano punkt nr 3, natomiast orientacja układu nastąpiła poprzez zdefiniowanie azymutu początkowego (100^{e}) boku 3 – 4, w przybliżeniu równoległego do dłuższego boku konstrukcji mostu (Rys. 4). Lokalizacja sytuacyjna układu, wynikała z ułatwień w przyszłej interpretacji ewentualnych przemieszczeń poziomych obserwowanych punktów, w kierunkach możliwie prostopadłych do osi układu oraz do konstrukcji mostu. Punkty tworzące początek i orientację układu lokalnego współrzędnych były najbardziej odległe od monitorowanego obiektu, zatem znajdowały się możliwie najdalej poza strefą wpływów czynników ruchu konstrukcji, mogących powodować ich przemieszczenia.

Wyniki analiz zestawiono w tabelach 1, 2 oraz na rysunkach 10, 11.

Uzyskane wartości błędów średnich (Tab. 1) są oczywiście zależne od przyjętych a priori błędów obserwacji (wzory 1 ÷ 5). Wprowadzenie dodatkowych (w stosunku do wariantu KL), niezależnych quasi-obszacji (wariant KL+Q) powoduje znaczne zwiększenie liczby obserwacji nadokreślających ($m - n$; zob. Tab. 2) i w konsekwencji wzrost dokładności wyznaczanych punktów (zmniejszenie błędów położenia rzędu 25 – 30%). W tabeli 1 zestawiono również błędy położenia punktów niestabilizowanych (MOD oraz MOD+Q); punkty pośrednie („stracone”) mogą bowiem stanowić jednocześnie stanowiska obserwacyjne dla punktów reprezentujących badany obiekt (por. Rys. 3). Wartości błędów średnich wyznaczenia tych punktów (nr 100 ÷ 700) kształtują się na podobnym poziomie jak dla punktów stabilizowanych (nr 1 ÷ 7) – wynika to m.in. z niższych błędów średnich pomiaru kierunków (brak wpływu błędu centrowania instrumentu).

Tabela 1. Wyniki wstępnych analiz dokładności (błędy średnie w [m])

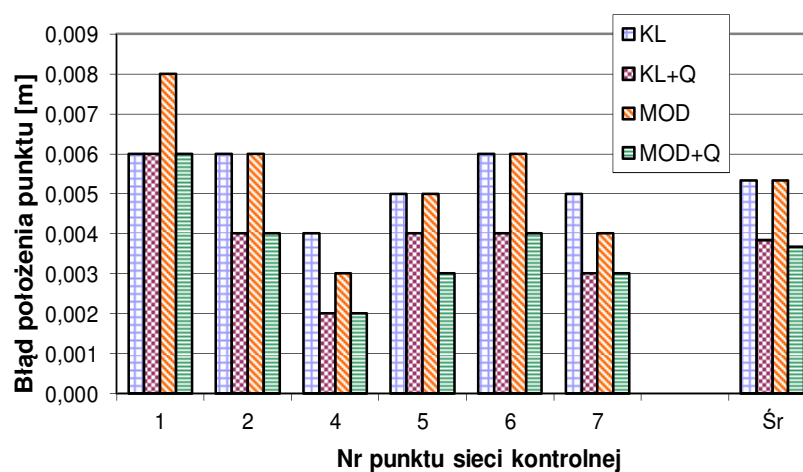
Table 1. Results of preliminary accuracy analyzes (mean errors in [m])

Nr pkt	KL			KL+Q			MOD			MOD+Q		
	m_x	m_y	m_p	m_x	m_y	m_p	m_x	m_y	m_p	m_x	m_y	m_p
1	0,004	0,004	0,006	0,003	0,005	0,006	0,004	0,007	0,008	0,003	0,005	0,006
2	0,004	0,004	0,006	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,006	0,002	0,003	0,004
4	0,002	0,004	0,004	0,000	0,002	0,002	0,000	0,003	0,003	0,000	0,002	0,002
5	0,004	0,003	0,005	0,002	0,003	0,004	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003	0,003
6	0,004	0,004	0,006	0,002	0,004	0,004	0,003	0,005	0,006	0,002	0,004	0,004
7	0,004	0,003	0,005	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004	0,002	0,002	0,003
(\bar{S}_r)	0,0053			0,0038			0,0053			0,0037		
100	-	-	-	-	-	-	0,003	0,006	0,007	0,002	0,005	0,005
200	-	-	-	-	-	-	0,004	0,006	0,007	0,003	0,004	0,005
300	-	-	-	-	-	-	0,003	0,003	0,004	0,002	0,002	0,003
400	-	-	-	-	-	-	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003
500	-	-	-	-	-	-	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004
600	-	-	-	-	-	-	0,002	0,004	0,005	0,002	0,003	0,004
700	-	-	-	-	-	-	0,002	0,004	0,004	0,002	0,003	0,003
(\bar{S}_r)							0,0049			0,0039		

Tabela 2. Wyznaczalność i niezawodność sieci kontrolnej (w_i – l. niezależnych obserwacji wyznaczających i -ty punkt; m – l. wszystkich obserwacji; n – l. niewiadomych; z – parametr niezawodności)

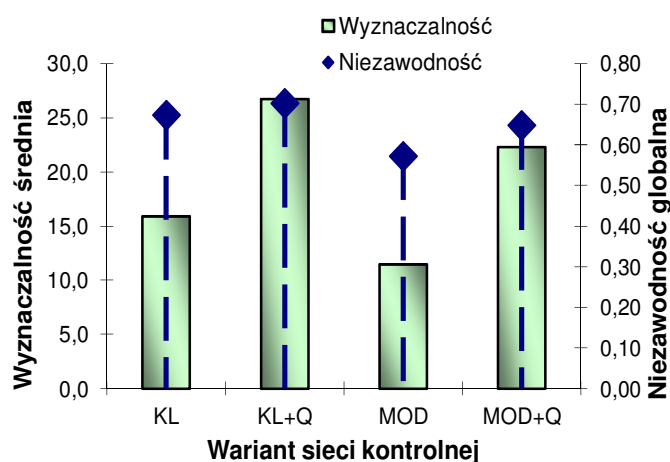
Table 2. Determinability and reliability of the control network (independent observations determining the i -th point, m - num. of all observations, n - num. of unknowns, z - parameter of reliability)

Wariant sieci	Wyznaczalność punktów sieci								Niezasadność globalna		
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	$w_{\Sigma r}$	m	n	z
KL	14	14	14	18	17	17	17	15,9	58	19	0,67
KL+Q	24	24	22	30	29	29	29	26,7	134	40	0,70
MOD	8	14	11	11	14	8	14	11,4	77	33	0,57
MOD+Q	16	28	19	21	28	16	28	22,3	153	54	0,65



Rys. 10. Porównanie dokładności różnych wariantów sieci kontrolnej

Fig. 10. Comparing the accuracy of different variants of the control network



Rys. 11. Porównanie wyznaczalności i niezawodności dla różnych wariantów sieci kontrolnej

Fig. 11. Comparison of determinability and reliability for different variants of the control network

Zastosowanie sieci modularnej (MOD) zamiast klasycznej (KL) prowadzi do niewielkiego spadku dokładności (niższa wyznaczalność), ale jest korzystniejsze ze względów praktycznych: brak czynności centrowania instrumentu oraz błędów z tym związanych. Prosty sposób podniesienia dokładności wyznażeń jest wprowadzenie (w sieci MOD) dodatkowych, niezależnych quasi-obszacji (MOD+Q) – w efekcie uzyskane wartości błędów położenia punktów spadają do poziomu zaobserwowanego dla wariantu KL+Q. Zaletą tego rozwiązania jest jednak mniejsza pracochłonność na etapie pomiaru (dowolność w doborze stanowisk oraz brak konieczności centrowania instrumentu).

Pozostałe wskaźniki jakości technicznej sieci geodezyjnej (wyznaczalność, niezawodność – zob. Tab. 2) zmieniają się dla poszczególnych wariantów badawczych na podobnej zasadzie jak przy analizie błędów średnich: najkorzystniej wypadają warianty z dodatkowymi quasi-obszacjami (KL+Q oraz MOD+Q). Wyrażnie niższe wskaźniki wyznaczalności w wariantach KL oraz MOD nie przekładają się jednak na istotny spadek niezawodności globalnej (zob. Rys. 11), co świadczy o prawidłowej, całej strukturze geometrycznej ocenianych wariantów sieci).

6. Badanie stabilności punktów osnowy kontrolnej

Zachowanie stałości punktów sieci odniesienia jest obligatoryjnym warunkiem wyznaczania epokowych przemieszczeń i odkształceń monitorowanego obiektu [3]. Weryfikacja stabilności elementów sieci to proces polegający na poszukiwaniu w zbiorze prawdopodobnych punktów odniesienia podzbioru punktów wzajemnie nieprzemieszczonych. Proces ten realizowany jest w oparciu o odpowiednio opracowane wyniki pomiarów [24; 4]. Określenie właściwej metodyki pomiaru oraz wyrównania sieci kontrolnej to zadanie niezwykle istotne w procesie identyfikacji punktów stabilnych. Innym, równie ważnym zadaniem jest odpowiednio, aprioryczne oszacowanie dokładności pomiarów, z uwzględnieniem ewentualnych czynników zakłócających pomiar [4]. Parametry dokładności sprostżeń przyjmowane przed ścisłym wyrównaniem mają bezpośredni wpływ na jego wyniki, które przede wszystkim pełnią funkcję diagnostyczną, pozwalając sprawdzić poprawność całego materiału obserwacyjnego [28] oraz stanowią podstawę określania kryteriów wzajemnej stałości punktów [24].

W celu sprawdzenia stabilności położenia punktów sieci oraz weryfikacji poprawności zastosowanego sposobu stabilizacji jej elementów dokonano pomiaru sieci w dwóch epokach czasowych, oznaczonych jako: „Osnowa Ia” oraz „Osnowa I”.

W obydwu przypadkach pomiar sytuacyjny przeprowadzono tachimetrem elektronicznym Leica TC 2003 (1 mm+1 ppm; 0.5"). Pryzmaty celownicze (GPR121 PRO) centrowano i poziomowano na statywach ze spodarkami nad każdym z punktów osnowy. Na każdym stanowisku dokonano pomiaru w dwóch seriach (możliwie do każdego z punktów osnowy). Po wstępnym opracowaniu wyników pomiarów, dokonano ścisłego wyrównania sieci poziomej w programie *Geo-Net*. W celu zdefiniowania układu lokalnego przyjęto a priori bezbłądność punktu osnowy nr 3 oraz azymutu do punktu nr 4 (podobnie jak przy wstępnych analizach dokładności).

W następnym kroku dokonano (również w programie *GeoNet*) analizy przemieszczeń poziomych dla dwóch zbiorów wyrównanych współrzędnych: Osnowy Ia oraz Osnowy I. Punkty analizowanej sieci kontrolnej nie podlegały nigdy wcześniej weryfikacji co do stałości ich położenia, w związku z czym w obliczeniach zastosowano metodę transformacji poszukiwawczej, wykonując kolejne liniowe transformacje konforemne sieci aktualnej na punkty sieci pierwotnej. Dzięki zastosowaniu metody transformacji Helmerta obliczono przemieszczenia sytuacyjne osnowy, eliminując w ten sposób wpływ założenia bezbłądności współrzędnych (X, Y) punktu nr 3 oraz kierunku na punkt nr 4 i zastępując je założeniem stałości położenia wszystkich punktów osnowy. Konforemna transformacja liniowa pozwoliła także na uwzględnienie w procesie identyfikacji punktów stałych parametru zmiany skali, który zapewnił eliminację ewentualnego niedoszacowania wpływu błędów systematycznych na pomiary liniowe sieci [4]. Analiza istotności przemieszczeń polegała na porównaniu składowych przemieszczeń z podwójnymi wartościami ich błędów średnich (Tab. 3), co stanowi typowe kryterium istotności przyjmowane w analizie stabilności [24].

W wyznaczeniu błędu średniego przemieszczenia uwzględniono trzy niezależne komponenty: błąd współrzędnej z wyrównania swobodnego sieci pierwotnej, błąd współrzędnej z wyrównania swobodnego sieci aktualnej oraz błąd układu odniesienia wynikający z odchyłek transformacji współrzędnych na wspólnych punktach odniesienia. W wyniku analizy przemieszczeń punktów sieci kontrolnej nie stwierdzono elementów przemieszczonych (Tab. 4).

Tabela 3. Wyniki analizy przemieszczeń poziomych sieci kontrolnej w okresie „Ia – I”

Table 3. The analysis results of the horizontal displacements of the control network during the period „Ia – I”

Nr pkt	Układ pierwotny		Układ aktualny (po transformacji)		Składowe przemieszczenia i ich błędy średnie		Przemieszczenie wypadkowe i błąd średni	Identyfikacja punktu stałego
	Osnowa Ia		Osnowa I po transformacji		dx [mm]	dy [mm]		
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	m _{dx} [mm]	m _{dy} [mm]	m _{dr} [mm]	
1	1104.2616	972.1013	1104.2621	972.1015	0.51	0.18	0.54	s
					1.03	0.89	0.55	
2	1061.6493	978.3105	1061.6493	978.3107	0.01	0.22	0.22	s
					0.66	0.61	0.90	
3	1000.0000	1000.0000	999.9996	999.9999	-0.39	-0.15	0.42	s
					0.18	0.18	0.26	
4	1000.0000	1048.1972	1000.0002	1048.1977	0.19	0.45	0.49	s
					0.41	0.41	0.58	
5	1056.0511	1042.5570	1056.0508	1042.5568	-0.34	-0.24	0.42	s
					0.15	0.15	0.02	
6	1077.2169	1037.5279	1077.2166	1037.5273	-0.32	-0.62	0.69	s
					0.66	0.53	0.85	
7	1023.6201	1019.9379	1023.6204	1019.9381	0.35	0.15	0.38	s
					0.39	0.39	0.55	

7. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej pracy zrealizowano następując zadania badawcze:

- analiza literatury (w tym kolejowych przepisów branżowych) pod kątem potrzeby prowadzenia badań stabilności obiektów mostowych (rozdz. 1);
- ustalenie warunków i możliwości wykonania pomiarów przemieszczeń dla badanego obiektu (rozdz. 2);
- wykonanie projektu (optymalnego rozmieszczenia punktów) sieci kontrolnej oraz opracowanie warunków stabilizacji (rozdz. 3);
- określenie możliwości wykorzystania technologii sieci modularnych dla celów badania przemieszczeń (rozdz. 4);
- opracowanie procedury określania błędów średnich obserwacji kierunkowych i liniowych (rozdz. 5);
- przeprowadzenie wstępnych analiz dokładności dla czterech wariantów sieci kontrolnej oraz analiza porównawcza uzyskanych wyników (rozdz. 5);
- badanie stabilności punktów sieci kontrolnej (rozdz. 6).

Zestawione powyżej etapy prac badawczych stanowią podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- Geodezyjne badania stabilności mostów kolejowych stanowią podstawowe narzędzie w diagnostyce obiektów infrastruktury szynowej; realizację układu odniesienia w tych badaniach zapewnia sieć kontrolna, czyli zbiór punktów zaprojektowanych i zastabilizowanych trwale na potrzeby okresowych obserwacji obiektu;
- Obiekt badawczy (most kolejowy w kilometrażu 2.485 linii kolejowej nr 098 Sucha Beskidzka – Chabówka) stanowi ponad 50-letnią konstrukcję, której aktualne parametry eksploatacyjne powinny zostać ponownie wyznaczone m.in. na podstawie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń i odkształceń;
- Ustalona lokalizacja punktów osnowy kontrolnej jest wynikiem optymalizacji całego procesu pozyskiwania danych przestrzennych dla badanego obiektu (m.in. parametrów technicznych instrumentów geodezyjnych, specyfiki warunków terenowych oraz monitorowanego obiektu, przewidywanego czasu trwania pomiaru);
- Przyjęty optymalny sposób stabilizacji punktów polegał na posadowieniu w gruncie słupów betonowych o długości 120 cm oraz średnicy 160 mm, z osadzonymi w masie betonowej centrami z metalu nierdzewnego;
- Elementy konstrukcyjne sieci modularnych (quasi-obszary kątowno-liniowe lub kątowne) mogą służyć polepszeniu wartości technicznej sieci kontrolnych do pomiaru przemieszczeń;
- Jednym z etapów poprawnie przeprowadzonego procesu projektowania osnowy powinna być wstępna analiza dokładności, a pierwszym krokiem w tym zadaniu jest odpowiednie oszacowanie wartości błędów średnich obserwacji (w badanym przypadku – kierunków i długości), z uwzględnieniem wpływu błędów centrowania instrumentu i sygnału oraz błędów identyfikacji punktów; przypadku pomiaru na stanowisku niecentrowanym (sieć modularna) nie wystąpią błędy związane z centrowaniem instrumentu;

- We wszystkich czterech zaproponowanych wariantach testowych sieci kontrolnej uzyskano zadowalające parametry dokładnościowe (błędy położenia punktów); wprowadzenie do wariantu sieci klasycznej dodatkowych, niezależnych quasi-obszacji kąto-liniowych powoduje znaczne zwiększenie liczby obszacji nadokreślających i w konsekwencji wzrost dokładności wyznaczanych punktów (rzędu 25 – 30%);
- Zastosowanie sieci modularnej zamiast klasycznej prowadzi do niewielkiego spadku dokładności, ale jest korzystniejsze ze względów praktycznych (m.in. brak czynności centrowania instrumentu oraz błędów z tym związanych);
- W przypadku analizy wskaźników wyznaczalności i niezawodności najkorzystniej wypadają warianty z dodatkowymi quasi-obszacjami; najwyższą niezawodność globalną uzyskano dla sieci klasycznej z dodatkowymi quasi-obszacjami (70%), a najniższą dla sieci modularnej (57%);
- Istotną cechą sieci modularnych jest ich elastyczność: stanowiska mogą być obierane dowolnie (korzystnie ze względu na możliwości obszacji); obrane stanowisko może jednocześnie służyć do pomiaru osnowy i pomiaru badanego obiektu;
- W wyniku badania stabilności punktów osnowy kontrolnej, wykonanego metodą transformacji poszukiwawczej dla dwóch pomiarów okresowych, nie stwierdzono elementów przemieszczonych.

Literatura

- [1] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [2] Bryś H., Przewłocki S.: Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [3] Ćwiakła P., Deska K., Kocierz R., Ortyl Ł., Owerko T., Puniach E., Skrzypczak I., Świętoń T.: Wybrane problemy geodezji inżynierskiej, Wyższa Szkoła Inżyniersko-Ekonomiczna z siedzibą w Rzeszowie, Rzeszów 2015.
- [4] Deska K.: Badania sieci odniesienia do wyznaczania przemieszczeń obudowy wykopu. Materiały Budowlane, Wyd. SIGMA-NOT, Warszawa, Nr 11, 2013, s. 55-58.
- [5] Gargula T.: Zastosowanie ciągów modularnych do pomiarów sytuacyjnych, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Nr 44, 1995, s. 33-41.
- [6] Gargula T.: Zastosowania specjalne sieci modularnych, Acta Scientiarum Polonorum – Geodesia et Descriptio Terrarum, Nr 2 (1-2), 2003, s. 109-118.
- [7] Gargula T.: Algorithm for rigorous adjustment of modular networks, Geodezja i Kartografia, Nr 52 (3), 2003, s. 143-152.
- [8] Gargula T.: Research on geometrical structure of modular networks, Geodezja i Kartografia, Nr 53 (3-4), 2004, s. 189-202.
- [9] Gargula T.: A kinematic model of a modular network as applied for the determination of displacements, Geodezja i Kartografia, Nr 58 (2), 2009, s. 51-67.
- [10] Gargula T.: The conception of integrated survey networks composed of modular networks and GPS vectors, Survey Review, Nr 41, 2009, s. 301-313.
- [11] Gargula T.: Zintegrowane sieci modularne w zastosowaniu do wyznaczania przemieszczeń, Zeszyty Naukowe UR w Krakowie, Nr 473, 2011, ser. Rozprawy, z. 350, 121 stron.

- [12] Gargula T.: Numeryczne opracowanie tachimetrycznej osnowy modularnej. Przegląd Geodezyjny, Warszawa, Nr 1, 2016, s. 5-9.
- [13] Gawronek P.: Metodyka badania stabilności obiektów mostowych z zastosowaniem naziemnego skaningu laserowego, Rozprawa doktorska (maszynopis), UR Kraków 2017.
- [14] GG-00.13.01: Pomiary przemieszczeń i odkształceń obiektów mostowych metodami geodezyjnymi, Ogólne Specyfikacje Techniczne, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa 1998.
- [15] GK-1: Standard techniczny "O organizacji i wykonywaniu pomiarów w geodezji kolejowej GK-1", Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2015.
- [16] Gocał J.: Geodezja inżyniersko-przemysłowa - część 2, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [17] GUGiK.: Wytyczne techniczne G-4.1 „Sieci modułowe”, Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa 1986.
- [18] Id-16: Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynierskich na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h, Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2014.
- [19] Kadaj R.: Sieci geodezyjne poziome o specjalnej strukturze obserwacyjnej, Geodezja i Kartografia, Nr 25 (4), 1976, s. 249-255.
- [20] Kadaj R.: Problematyka obliczeniowa poziomych osnów szczegółowych III klasy oraz osnów pomiarowych w układzie „2000”, Publikacje internetowe. AlgoRes-Soft, Rzeszów 2003.
- [21] Kadaj R.: System geodezyjny GeoNet (4.0-5.0) – opis funkcjonalny i instrukcja obsługi, AlgoRes-Soft, Rzeszów 2006.
- [22] Klasztorny M.: Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkobieżnymi, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [23] Kryński J.: Krótki wykład: Systemy i układy współrzędnych nie tylko dla nas, On-line, 2004, www.geoforum.pl/geodeta (dostęp: 20.08.2017).
- [24] Lazzarini T.: Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i otoczenia, Wyd. PPKW, Warszawa 1977.
- [25] Mercik S.: Niektóre problemy geodezyjne w badaniu odkształceń mostów, Przegląd geodezyjny. Nr 4, 1979, s. 309-313.
- [26] PN-N-02211: Geodezja - Geodezyjne wyznaczanie przemieszczeń - Terminologia podstawowa, 2000.
- [27] PN-S-10050: Obiekty mostowe - Konstrukcje stalowe - Wymagania i badania, 1989.
- [28] Prószyński W., Kwaśniak M.: Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [29] Ruopp M.: Genauigkeitsbetrachtungen zur polaren Punktbestimmung mit elektronischen Tachymetern bei freier Standpunktswahl, Allgemeine Vermessung Nachrichten, Nr 8: 1971, s. 289-299.
- [30] Standardy techniczne: Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) - Tom I, Droga szynowa, PKP PLK SA., Warszawa 2009.
- [31] www.geoportal.gov.pl (dostęp: 20.08.2017).

THE DESIGN WORK ON SETTING UP A CONTROL NETWORK FOR THE PURPOSE OF EXAMINING THE STABILITY OF A RAILWAY BRIDGE USING THE IDEA OF MODULAR NETWORKS

S u m m a r y

The control network used to study the stability of a railway bridge was designed with taking into account the basic technical aspects: the ground stability, the location of the points, and the geometric conditions that should be fulfilled by the control network to determine the displacement. The numerical design parameters of the proposed network include positional error, determinability and global reliability. Measurement of the network was made by classical terrestrial techniques on the basis of the survey stations centered over the marked points. In order to improve the technical quality of the network, additional angular-linear quasi-observations were proposed on the basis of free positions (without centering). Another suggestion was to use the idea of modular networks to determine the position of the control network points. Computational work consisted on, among others, performing a preliminary analysis of accuracy and examining the stability of the network points.

Keywords: displacement, marking of survey points, reference system, reliability

Przesłano do redakcji: 19.09.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.