

WIESŁAW PAWŁOWSKI

Katedra Geodezji, Kartografii Środowiska i Geometrii Wykreślnej
Politechniki Łódzkiej

KRZYSZTOF DESKA

Katedra Geodezji Gospodarczej
Politechniki Koszalińskiej

REJESTRACJA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ PRZEKRYCIA WISZĄCEGO NA PRZYKŁADZIE ZADASZENIA AMFITEATRU W KOSZALINIE

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Henryk Bryś**

Na przykładzie zadaszania amfiteatru w Koszalinie prezentowane są wyniki badań doświadczalnych związanych z pozyskiwaniem i interpretacją danych o strukturze geometrycznej przekrycia na potrzeby diagnostyki. Zakres przeprowadzonych badań obejmuje pomiary bezpośrednie metodą biegunową z użyciem tachimetrów bezlustrowych, fotogrametrię bliskiego zasięgu, skanowanie laserowe oraz termowizję, głównie w kontekście ich efektywności na tle oczekiwań konstruktora powyższego przekrycia.

1. Ogólna charakterystyka przekryć wiszących i ich diagnostyki

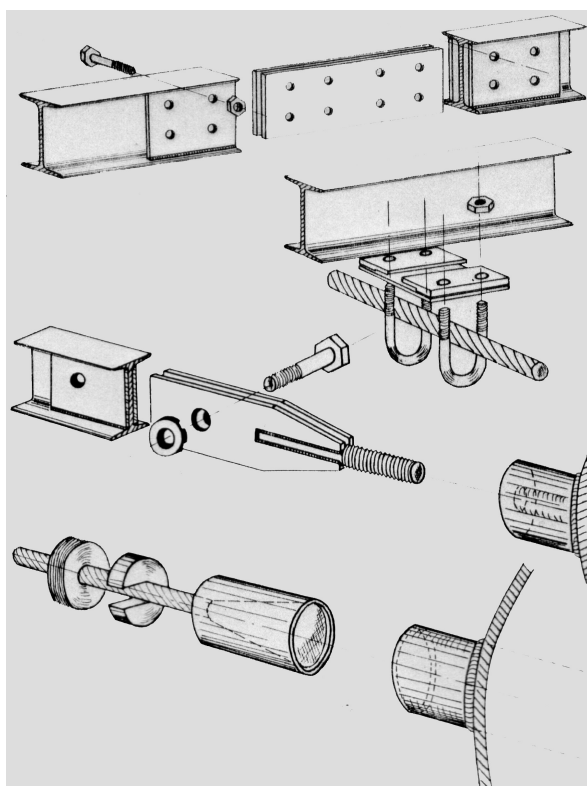
Za szczególnie lekkie i efektywnie spełniające swe podstawowe funkcje, uznaje się obecnie przekrycia wiszące [1]. Istotną cechą takich przekryć jest wykorzystanie zdolności nośnej na rozciąganie odpowiednio przygotowanych cięgien (lin). W zależności od rodzaju zastosowanych podpór, sposobu rozmieszczenia i zamocowania cięgien oraz wymagań funkcjonalnych, przekrycia wiszące mogą być konstruowane jako układy płaskie lub przestrzenne o znacznych rozpiętościach [2].

Przenoszenie obciążeń przez przekrycia wiszące jest możliwe po odpowiednim sprzężeniu wstępnym jego konstrukcji, które nadaje wymaganą sztywność umożliwiającą zachowanie pożądanego kształtu w sytuacji oddziaływania różnych czynników, jak np. ciężar własny, obciążenie śniegiem, zmiany temperatury i parcie wiatru. Przykładem przekrycia wiszącego jest zadaszanie amfiteatru w Koszalinie przedstawione na rys.1, którego konstrukcję stanowi wstępnie napięta siatka cięgnowa w kształcie paraboloidy hiperbolicznej, zamocowana do obrzeżowego dźwigara stalowego, tworząca w rzucie poziomym soczewkę o wymiarach 101,80 na 58,60 m i powierzchni 4460 m² [3].



Rys. 1. Przekrycie wiszące jako zadaszenie amfiteatru

Fig. 1. Suspended roof of the open-air theatre



Rys. 2. Detale siatki konstrukcyjnej przekrycia

Fig. 2. Details of the construction network

W kontekście potrzeb diagnostycznych, w ogólnym przypadku, najbardziej istotna jest właściwa rejestracja geometrii konstrukcji po jej zrealizowaniu (inwentaryzacja powykonawcza), gdyż wprowadzenie dodatkowych sił sprężających podczas montażu przekrycia wiszącego, powoduje na ogół znaczne odstępstwa jego geometrii od założeń projektowych. W takiej sytuacji niezbędne jest wykonanie ponownych obliczeń wytrzymałościowych odnoszących się już do geometrii konstrukcji istniejącej, której rejestracja może ograniczać się tylko do wybranych punktów przekrycia. Przedmiotem obserwacji mogą wtedy być detale siatki konstrukcyjnej stanowiące jej węzły w miejscach połączeń lin z dwuteownikami, tj. ciągien nośnych z ciągami napinającymi (lina między dwoma obejmami – detal 1 – rys. 2) [3].

2. Metody pomiarowe

2.1. Uwarunkowania i zakres przeprowadzonych badań

Wybór metody rejestracji struktury geometrycznej przekrycia wiszącego powinien uwzględniać następujące uwarunkowania:

- oddziaływanie czynników zewnętrznych mających wpływ na zmiany wymiarów i kształtu przekrycia oraz położenia węzłów siatki konstrukcyjnej w porównaniu do założeń projektowych,
- wielkość i szybkość powyższych zmian,
- wymiary i kształt węzłów (detali) siatki konstrukcyjnej przekrycia,
- właściwości konstrukcyjno – projektowe przekrycia,
- wymagana dokładność wyznaczenia położenia detali, ustalona a priori przez konstruktora na poziomie ± 3 cm do ± 5 cm,
- wymagany zakres rejestracji w kontekście dostępności niezbędnego instrumentarium pomiarowego oraz czasu trwania pomiaru z jego użyciem i opracowania wyników,
- moment wykonania rejestracji (przykładowo przed wstępnym sprężeniem konstrukcji, po sprężeniu, okresowo na etapie użytkowania, w warunkach obciążenia śniegiem bądź zaistnienia stanu przedawaryjnego).

Mając na uwadze powyższe uwarunkowania, zakres badań przeprowadzonych na obiekcie testowym obejmował:

- ✓ pomiary bezpośrednie metodą biegunową z naziemnych stanowisk swobodnych pod przekryciem (tachimetrie elektroniczne Leica TCR407 Power i Topcon GPT 3007),
- ✓ metodę fotogrametryczną bliskiego zasięgu z wykorzystaniem cyfrowych aparatów średniorozdzielczych (aparat Olympus E300 z obiektywem ZUIKO DIGITAL 14-45mm oraz oprogramowanie Topcon Image Surveying Station PI-3000 i PI-Calib),
- ✓ skanowanie laserowe (skaner laserowy HDS Leica ScanStation oraz oprogramowanie Leica Cyclone v.5.8).

Powyższe badania rozszerzono o termowizję umożliwiającą rejestrację rozkładu temperatury na powierzchni przekrycia, której zmiany są przez konstruktorów interpretowane jako specyficzny rodzaj obciążenia konstrukcji cięgnowych. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano kamerę termowizyjną AGEMA LWB 880, kolorową kamerę wizyjną CCD dla orientacji obrazu oraz program Thermoscope v.2.03.

2.2. Metoda biegunowa

W przypadku walcowych detali siatki konstrukcyjnej przekrycia, obserwowanych metodą biegunową, pomiar kierunku i odległości odnosi się każdorazowo do punktu na powierzchni detalu, odpowiadającego środkowi jego obrazu w lunecie tachimetru elektronicznego.

Wyniki badań przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych i na obiekcie amfiteatru w zakresie pomiarów kierunku i odległości do walcowych detali obserwowanych pod różnymi kątami, stanowiących węzły siatki konstrukcyjnej przekrycia wiszącego, wskazują jednoznacznie, że konsekwencją powyższej sytuacji będzie zawsze rejestracja punktu oddalonego nie więcej niż 27 mm od środka detalu [4]. Mając na uwadze oczekiwania dokładnościowe konstruktora przekrycia, na poziomie od ± 3 cm do ± 5 cm, za niecelowe można uznać w tej sytuacji zarówno określanie występujących mimośrodków, jak i wprowadzanie odpowiednich redukcji do wyników pomiaru odległości i kierunku oraz dodatkową sygnalizację obserwowanych punktów przekrycia.

Wyniki kolejnych obserwacji metodą biegunową wybranych węzłów (rys.3) konstrukcji przekrycia w postaci ich współrzędnych w przyjętym układzie odniesienia, stanowiły każdorazowo podstawę do wykonania symulacji obliczeniowych z zakresu wytrzymałości konstrukcji oraz sporządzenia okresowych ekspertyz z zakresu jej bezpieczeństwa [5].

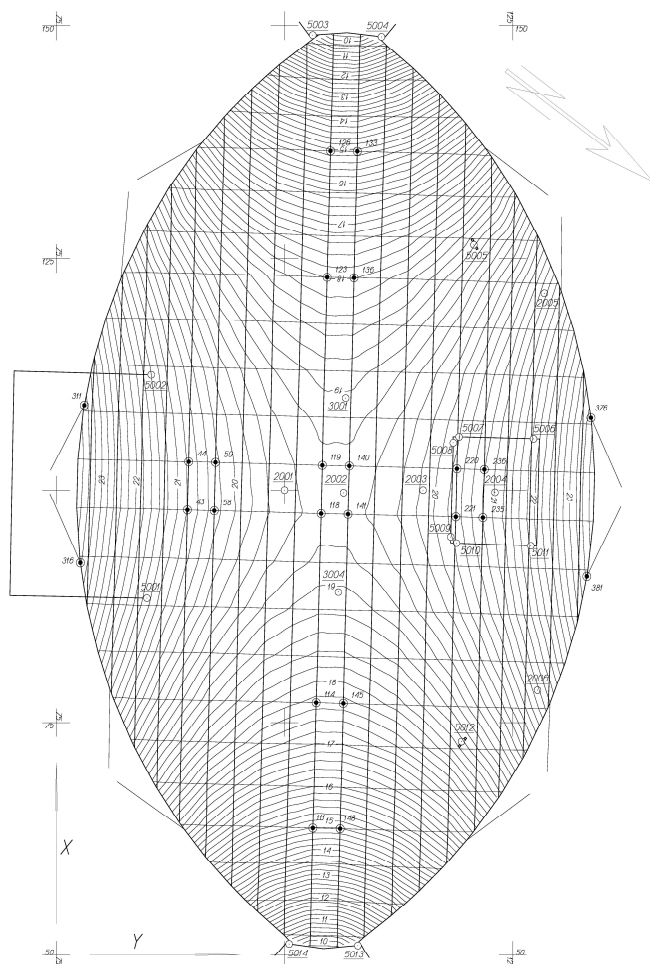
Na podstawie porównania współrzędnych punktów (44,43,58,59; 111,114,145,148; 118,119,140,141; 123,126,133,136; 220,221,235,236) będących wynikiem kolejnych obserwacji okresowych przekrycia, stwierdzono m.in.:

- wystąpienie największych przemieszczeń pionowych o wartości 51 cm ku dołowi w części środkowej przekrycia i wzdłuż krótszej jego osi symetrii przy jednoczesnym wypiętrzeniu od 17 cm do 21 cm w węzłach konstrukcji położonych w pobliżu podpór, w sytuacji obciążenia śniegiem o masie około 51 kg/m^2 ,
- porównywalność przemieszczenia pionowego konstrukcji w części środkowej przekrycia z tytułu zmiany temperatury pod nim o 30°C z przemieszczeniem pionowym odpowiadającym obciążeniu przekrycia warstwą śniegu o wadze około 15 kg/m^2 ,
- zgodność zmian współrzędnych x , y i z punktów symetrycznie położonych względem osi konstrukcji, co w znacznym stopniu uzasadniało wnioskowanie o prawidłowej pracy konstrukcji pod obciążeniem.

2.3. Metoda fotogrametryczna

Metoda fotogrametryczna w kontekście zastosowań inżynierskich posiada istotne zalety, którymi są m.in. krótki czas prac terenowych oraz możliwość jednoczesnej rejestracji geometrii całego obiektu lub wybranych jego elementów niedostępnych do pomiaru bezpośredniego metodami geodezyjnymi.

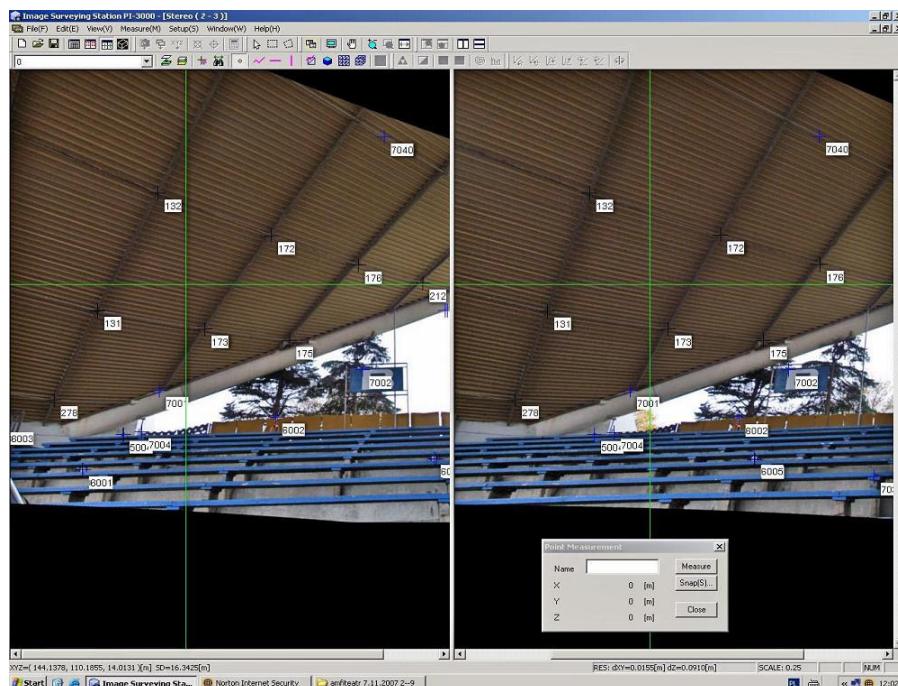
W przeprowadzonych badaniach model wybranego fragmentu konstrukcji przekrycia obejmujący 1/10 jego powierzchni został utworzony na podstawie 8 zdjęć tworzących 7 stereopar oraz 15 punktów o współrzędnych wyznaczonych metodą biegunową i 24 punktów przejściowych, które jako punkty wspólne na kolejnych zdjęciach spełniały funkcję punktów łączących.



Dla punktów o znanych współrzędnych, parametry określające tzw. podstawową dokładność pomiarów stereoskopowych (budowy modelu), przyjmują wartości:

- rozdzielczość terenowa PlaneRes 5mm i DepthRes od 2 cm do 3 cm,
- odchylenie standardowe (Standard Deviation) $\sigma_x = 0.0171$ m, $\sigma_y = 0.0253$ m, $\sigma_z = 0.0109$ m.

Na jednym z wybranych stereogramów został wykonany pomiar współrzędnych x , y i z wybranych węzłów (detali) siatki konstrukcyjnej przekrycia (punkty 131,132,172,173,175,176,212,278 – rys. 4), które następnie porównano ze współrzędnymi wyznaczonymi metodą biegunową z użyciem tachimetru Topcon GPT 3007.



Rys. 4. Pomiar współrzędnych węzłów siatki konstrukcyjnej przekrycia

Fig. 4. Measurement of coordinates of points using

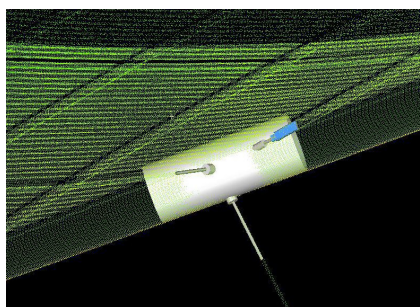
Mając na uwadze to, że obserwacje konstrukcji przekrycia powyższymi metodami wykonano w różnym czasie przy różnej temperaturze zarówno powietrza, jak i samego przekrycia, uzyskana zgodność wyznaczonych współrzędnych w granicach od -0.04 m do 0.03 m, wskazuje na porównywalne możliwości dokładnościowe obydwu metod w zakresie rejestracji struktury geometrycznej przekrycia wiszącego.

2.4. Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe jest postrzegane w geodezji inżynierskiej jako nowe podejście do zadania pomiarowego mającego na celu inwentaryzację struktury geometrycznej obiektów budowlanych.

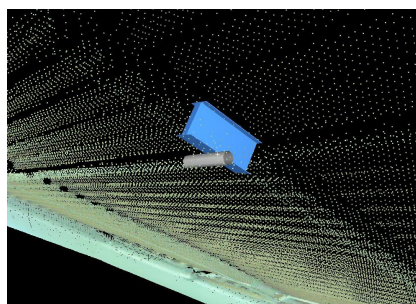
Zakres badań dotyczących wykorzystania skanowania laserowego do rejestracji struktury geometrycznej przekrycia wiszącego, miał przede wszystkim związek z rozdzielczością skanowania i obejmował kolejno:

- skanowanie z rozdzielczością 2 cm, zarówno w pionie jak i w poziomie, całej powierzchni przekrycia, z jednego stanowiska skanera z odległości około 50 m,
- dodatkowe skanowanie z rozdzielczością 2 mm tylko wybranych fragmentów powierzchni przekrycia z powyższego stanowiska (skaner laserowy, impulsowy HDS Leica ScanStation),
- skanowanie z rozdzielczością 5 mm, zarówno w pionie, jak i w poziomie, połowy powierzchni przekrycia z jednego stanowiska skanera zlokalizowanego w odległości około 35 m od wschodniego przyczółka (skaner HDS ScanStation 2),
- opracowanie elementów konstrukcji przekrycia zarejestrowanych w postaci chmur punktów (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Wymodelowany fragment łuku stalowego oraz lin

Fig. 5. A modelled part steel arch



Rys. 6. Wymodelowany fragment cięgna nośnego i dwuteownika

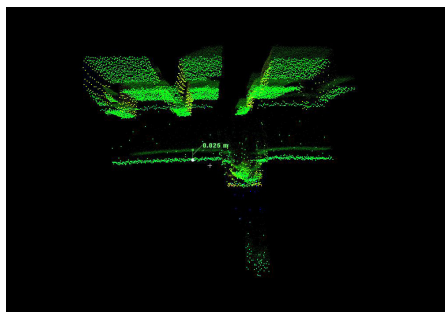
Fig. 6. A modelled part the suspension member and the I section

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że:

- do wymodelowania węzłów siatki konstrukcyjnej przekrycia jest wystarczająca rozdzielczość rzędu 5 mm w przypadku łuków stalowych i ich połączeń z cięgnami (detale 2 i 3 – rys. 2) oraz niezbędna co najmniej 2 mm w przypadku połączeń lin nośnych i napinających (detal 1 – rys. 2),
- ze względu na dynamikę zmian struktury geometrycznej przekrycia (szczególnie w części środkowej) będących wynikiem zmiany temperatury, skanowanie powinno być przeprowadzone w warunkach stabilnej temperatury

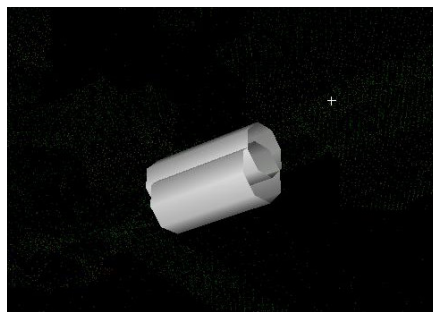
oraz braku nasłonecznienia i silnego wiatru, skanerem o możliwie jak największej szybkości skanowania (dokumentują to dwa skany tego samego elementu konstrukcji przekrycia, wykonane w odstępie kilku godzin w warunkach różnej temperatury (rys. 7 – w postaci dwóch chmur punktów i rys. 8 po oddzielnym wymodelowaniu fragmentu liny nośnej),

- w przypadku zaistnienia potrzeby pełnej rejestracji struktury geometrycznej przekrycia, optymalnym rozwiązaniem jest jednoczesne wykorzystanie dwóch lub czterech skanerów usytuowanych symetrycznie pod konstrukcją przekrycia i wykonanie skanowania z rozdzielczością 2mm (w miarę możliwości w tym samym czasie dwa skanery powinny jednocześnie skanować ten sam fragment konstrukcji).



Rys. 7. Dwa skany tego samego elementu wykonane w odstępie kilku godzin

Fig. 7. Two scans made within a few hours



Rys. 8. Wymodelowany fragment ciężna nośnego z dwóch chmur punktów

Fig. 8. A modelled part of the suspension member from two clouds of points

3. Zakończenie

Wnioski wynikające z badań wytrzymałościowych oraz pomiarów przekrycia o konstrukcji cięgnowej sprężonej, uzasadniają wyróżnienie dwóch różnych sytuacji w diagnostyce takiego przekrycia, uzależnionych przede wszystkim od momentu rozpoczęcia rejestracji jego struktury geometrycznej.

Najbardziej właściwe jest rozpoczęcie powyższej rejestracji już na etapie realizacji przekrycia i wykonanie odpowiednich pomiarów zarówno przed, jak i po sprężeniu jego konstrukcji w zakresie obejmującym praktycznie wszystkie węzły siatki konstrukcyjnej. Umożliwi to ocenę zmian wybranych cech geometrycznych przekrycia, będących konsekwencją sprężenia i ciężaru własnego. Kolejne pomiary już podczas użytkowania przekrycia powinny dostarczać danych o położeniu wszystkich węzłów siatki konstrukcyjnej w określonych przez konstruktora momentach czasowych oraz tylko wybranych elementów w przypadku obciążenia śniegiem.

Tak prowadzone pomiary umożliwiają zarówno ocenę stwierdzonych zmian geometrii przekrycia w funkcji czasu jego użytkowania, jak i ich powiązanie ze zmieniającym się stanem sił w konstrukcji, określonym na podstawie specjalistycznych obliczeń wytrzymałościowych.

W tym kontekście wyniki okresowych obserwacji struktury geometrycznej konstrukcji przekrycia mogą stanowić podstawę do oceny nośności i stanu wyęźnienia, bezpośrednio związanej z bezpieczeństwem użytkowania przekrycia.

Literatura

- [1] **Breger H.:** Light structures – structures of light: the art and engineering of tensile architecture, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser Verlag, 1996.
- [2] **Borusiewicz W.:** Konstrukcje budowlane dla architektów (Building Structures for Architects), Wyd. III, Wyd. Arkady, Warszawa, 1978.
- [3] **Filipkowski J.:** Construction of suspended roof over open-air theatre in Koszalin, Poland, Proc. Instn Civ. Engrs, 62, part 1, Aug. 1977.
- [4] **Deska K., Pawłowski W.:** Koncepcja metodyki testowania tachimetrów z laserowym dalmierzem impulsowym w kontekście pomiarów struktury geometrycznej przekryć wiszących. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Seria Budownictwo, z. 54, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2006.
- [5] **Filipkowski J., Jacoszek J., Deska K.:** Sposób odśnieżania zadaszenia amfiteatru w Koszalinie, cz. II, opracowanie zamawiane na zlecenie MOK w Koszalinie, Koszalin. 2006.

REGISTRATION OF GEOMETRICAL STRUCTURE OF SUSPENDED ROOF FOR EXAMPLE OF THE OPEN-AIR THEATRE ROOF IN KOSZALIN

Summary

The following paper uses the example of the open-air theatre roof in Koszalin to present the results of empirical research covering collection and interpretation of data concerning the geometric structure of a suspended roof for the purpose of its diagnostics. The conducted study covers direct surveying by the polar coordinates method with the use of reflectorless total station, close range photogrammetry, laser scanning, and thermovision, mainly in the context of their effectiveness with regard to specific expectations on the part of the constructors.