



JAN FILIPKOWSKI, [jan.filipkowski@wbiis.tu.koszalin.pl](mailto:jan.filipkowski@wbiis.tu.koszalin.pl)

KRZYSZTOF DESKA, [kdeska@wbiis.tu.koszalin.pl](mailto:kdeska@wbiis.tu.koszalin.pl)

Politechnika Koszalińska

## STRUKTURA GEOMETRYCZNA KONSTRUKCJI WISZĄCEJ I STAN PRZEMIESZCZENIA WYWOŁANY CIĘŻAREM ŚNIEGU

### GEOMETRICAL FRAMEWORK OF A SUSPENDED STRUCTURE AND THE STATE OF DISPLACEMENT DUE TO SNOW LOAD

**Streszczenie** W pracy omawiane są problemy związane z pomiarami geometrii konstrukcji wiszącej dachu amfiteatru w Koszalinie przed i po obciążeniu go ciężarem śniegu. Uzyskana w wyniku pomiarów geometria konstrukcji pozwala na analizę statyczną przekrycia za pomocą profesjonalnych programów obliczeniowych i daje możliwość odniesienia wyników obliczeń do wartości rzeczywistych. Wybrane, kontrolowane punkty umożliwiają określenie stanu zagrożenia konstrukcji dachu przy obciążeniu jego śniegiem. W części końcowej pracy podano warianty usuwania śniegu z części dachu i wyniki stosownych obliczeń.

**Abstract** The paper deals with the problems connected with the measurements of geometrical framework of a suspended roof over the open-air theatre in Koszalin before and after it has been loaded by snow. The obtained results permit to calculate the construction roof by means of professional computer programs and compare the numerical results with measurement ones. Selected controlled points permit to define the dangerous state of the roof construction loaded by snow. At the end of the paper variants of removing snow from the part of the roof and the appropriate calculations are presented.

### 1. Wprowadzenie

Podstawowym obciążeniem przekryć dachowych jest ciężar śniegu. Stwarza on realne zagrożenie dla bezpieczeństwa konstrukcji szczególnie w przypadku przekryć o dużych rozpiętościach pomiędzy podporami. Usuwanie śniegu z dachu nie jest łatwym problemem, gdy powierzchnia dachu wynosi kilka tysięcy metrów kwadratowych, a odległości do brzegów przekrycia są duże. Ręczne usuwanie śniegu staje się wówczas niewykonalne, a stosowanie urządzeń mechanicznych bardzo utrudnione. Jedynym właściwym rozwiązaniem jest zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji przekrycia zdolnej przenieść ciężar nagromadzonego na dachu śniegu.

W pracy niniejszej przedstawione są problemy związane z pomiarami geometrii samej konstrukcji, jak również jej deformacji wywołanej ciężarem śniegu. Analizowana jest konstrukcja przekrycia amfiteatru w Koszalinie (rys. 1), która spełnia pozytywnie swoją rolę od ponad 35 lat. Charakterystykę konstrukcji podano w punkcie 2 [1, 2, 3, 4]. Na podkreślenie zasługuje fakt, że przedmiotowa konstrukcja jest konstrukcją wiszącą, zaprojektowaną na podstawie badań modelowych i częściowych obliczeń numerycznych. Obecnie mając do dyspozycji doskonałe programy komputerowe umożliwiające przeprowadzenie w szerokim zakresie analizy statyczno-wytrzymałościowej, zaistniała potrzeba rejestracji rzeczywi-

stej struktury geometrycznej omawianej konstrukcji. Technika pomiarowa związana z tym zagadnieniem przedstawiona jest w punkcie 3 [5, 6, 7].

Zachowanie się obiektu w okresie zimowym, kiedy występowały duże opady śniegu, było zawsze przedmiotem zainteresowania autora projektu. Dokonywano szeregu szacunkowych pomiarów grubości warstwy śniegu na dachu i powodowanych ugięć. Impulsem do szczegółowych pomiarów i badań było podjęcie prac związanych z uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych przez współautora niniejszej pracy. Charakterystyczny rozkład śniegu na dachu i wywołane w wyniku jego ciężaru przemieszczenia w punktach kontrolowanych konstrukcji przedstawiono w końcowej części punktu 3. W punkcie 4 podano wyniki analiz numerycznych wykonanych przy użyciu programu ROBOT Millennium dla trzech wariantów obciążenia dachu ciężarem śniegu. Ostatni punkt pracy zawiera istotne uwagi końcowe.



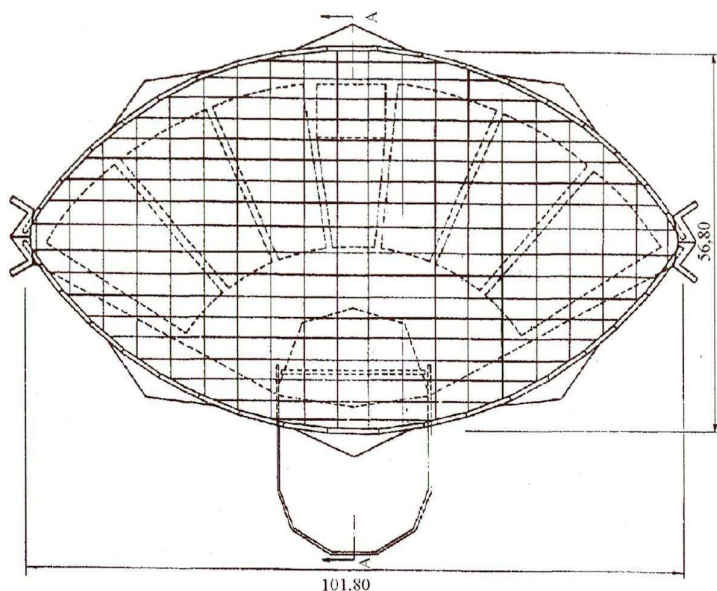
Rys. 1. Amfiteatr w Koszalinie (źródło: materiały własne konstruktora)

## 2. Charakterystyka konstrukcji

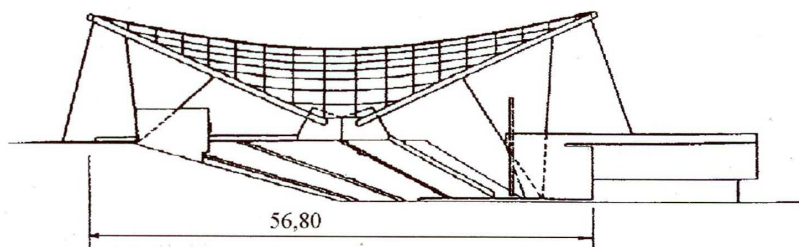
Dach nad amfiteatrem w Koszalinie jest przekryciem wiszącym, otwartym, chroniącym przed opadami całą widownię i scenę. Został zaprojektowany i wykonany w 1975 roku. Dach w rzucie ma kształt soczewki składającej się z dwóch wycinków kół. Jego powierzchnia zbliżona jest do paraboli hiperbolicznej. Rzut i przekrój przekrycia obrazują rys. 2 i rys. 3.

Podstawową konstrukcję przekrycia stanowią dwa płaskie, dwuprzegubowe łuki stalowe o kształcie eliptycznym. Łuki usytuowane są w płaszczyznach nachylonych do poziomu pod kątem około  $30^\circ$ . Praca ich w płaszczyznach skośnych uwarunkowana jest trzema parami odciągow po każdej stronie przekrycia. Pomiedzy łukami rozpięte są ciężne nośne (liny), na których spoczywają ciężne napinające (dwuteowniki). Do dwuteowników przymocowana jest za pomocą kołków „Hilti” stalowa ocynkowana i powlekana blacha trapezowa. Łuki nośne końcami, poprzez przeguby kuliste, opierają się o przyczółki żelbetowe, które połączone są monolitycznie z płytą żelbetową spoczywającą na 44 palach Franki.

Zasadnicze parametry obiektu: pole rzutu przekrycia  $4460 \text{ m}^2$ ; rozpiętość wzdłuż osi obiektu 101,8 m i 56,8 m; łuki główne z rur stalowych ze szwem  $D_z = 894 \text{ mm}$ ,  $g = 22 \text{ mm}$ ; ciężne nośne i odciągi z lin stalowych o konstrukcji zamkniętej  $d = 46 \text{ mm}$ ; ciężne napinające z walcowych dwuteowników IPN-140; pale żelbetowe pod fundamentami głównymi i blokami kotwiącymi typu Franki 48/52,  $l = 8 \text{ m}$ .



Rys. 2. Rzut przekrycia (źródło: oryginalne materiały własne konstruktora)



Rys. 3. Przekrój przekrycia (źródło: oryginalne materiały własne konstruktora)

Na uwagę zasługują: po pierwsze, sposób sprężenia konstrukcji, który zastrzeżony jest patentem nr 105128 z 1980 roku, polegający na napięciu siatki nośnej globalnie poprzez obrót łuków głównych względem osi przechodzącej przez przeguby, wywołany ciężarem własnym łuków i siłami w odcciągach, po drugie, zastosowanie sztywnych elementów, w postaci dwuteowników IPN-140 jako cięgien napinających.

### 3. Metodyka pomiarów geodezyjnych

Geodezyjne metody pomiarowe: biegunowa, wcięć, skanowanie laserowe i fotogrametria cyfrowa pozwalają na wyznaczanie zmian położenia elementów konstrukcyjnych przekrycia budowlanego z dokładnością wymaganą w kontekście analiz porównawczych obejmujących zaobserwowane i prognozowane przemieszczenia węzłów konstrukcji przekrycia wiszącego [5]. Istotnym jest, że nie tylko dla każdej z metod musi być spełnionych szereg warunków dotyczących wykonania pomiarów, lecz również w zależności od celu wykonania pomiarów i ich zakresu wybrana musi być odpowiednia metoda [5, 6]. Znaczenie podstawowe w tego rodzaju pomiarach posiada stały układ współrzędnych, zmaterializowany w praktyce przez

sieć punktów odniesienia. W przypadku współrzędnych punktów odniesienia przyjmowanych później jako bezbłędne niezbędnym staje się zastosowanie również odpowiednich procedur weryfikujących stałość ich położenia w wybranych przedziałach czasowych.

Metoda biegunowa jest obecnie postrzegana jako bardzo efektywna metoda pomiaru w celu wyznaczenia przemieszczeń, szczególnie dzięki możliwościom jakie stworzyły dalmierze bezzwierciadlane i dalmierze na podczerwień mierzące odległość do punktów sygnalizowanych folią odblaskową. Stosowanie swobodnego stanowiska obecnie wiąże się jedynie z umiejętnym wykorzystaniem możliwości technicznych współczesnego sprzętu. Zaletą podstawową jest pełna swoboda w wyborze dogodnych do realizowanego zadania i sytuacji terenowej stanowisk pomiarowych, a także brak konieczności centrowania instrumentu nad znakiem. Jest to technologia uniwersalna łącząca w sobie metodę wcięcia wstecz z metodą biegunową.

Metoda biegunowa z wykorzystaniem stanowisk swobodnych jest najbardziej efektywną w przypadku rejestracji położenia od kilkunastu do kilkudziesięciu wybranych punktów w każdej epoce pomiarowej. Nie jest ona natomiast, przede wszystkim ze względu na właściwości konstrukcji i jej dynamikę, efektywna w przypadku pomiarów o charakterze inwentaryzacyjnym obejmujących wszystkie węzły konstrukcji [5]. Pozwala uzyskiwać dokładności wyznaczenia położenia punktów kontrolowanych (sygnalizowanych) konstrukcji przekryć wiszących na poziomie 1 cm oraz 3 cm w przypadku węzłów konstrukcji (niesygnalizowanych) przy zachowaniu odpowiednich warunków obserwacji (stabilna temperatura, zachmurzenie ograniczające zmienne nasłonecznienie oraz bezwietrznie). Wyniki przeprowadzonych badań [5] potwierdzają, iż konstrukcje stalowe przekryć wiszących, w szczególności otwartych, są obiektami dynamicznymi, wyraźnie podatnymi na zmiany termiczne i ruchy powietrza [5], co ma decydujący wpływ na możliwe do osiągnięcia dokładności, dlatego też nie jest praktycznie możliwe uzyskanie dokładności wyższych niż 1 cm.

Do rejestracji pełnej, aktualnej struktury geometrycznej przekrycia – położenia wszystkich węzłów siatki konstrukcyjnej – wykorzystano tachimetr TOPCON GPT 3007, wyposażony oprócz dalmierza podczerwonego (IR) również w dalmierz laserowy (RL). Pomiar przedmiotowej konstrukcji wykonano w lipcu 2006 roku metodą biegunową z wykorzystaniem technologii stanowiska swobodnego. Wykorzystano założoną wcześniej sieć punktów odniesienia zastabilizowaną bolcami stalowymi w posadzce widowni i na dachu budynku sterówki oraz znaczkami z folii dalmierczej na przyczółkach.

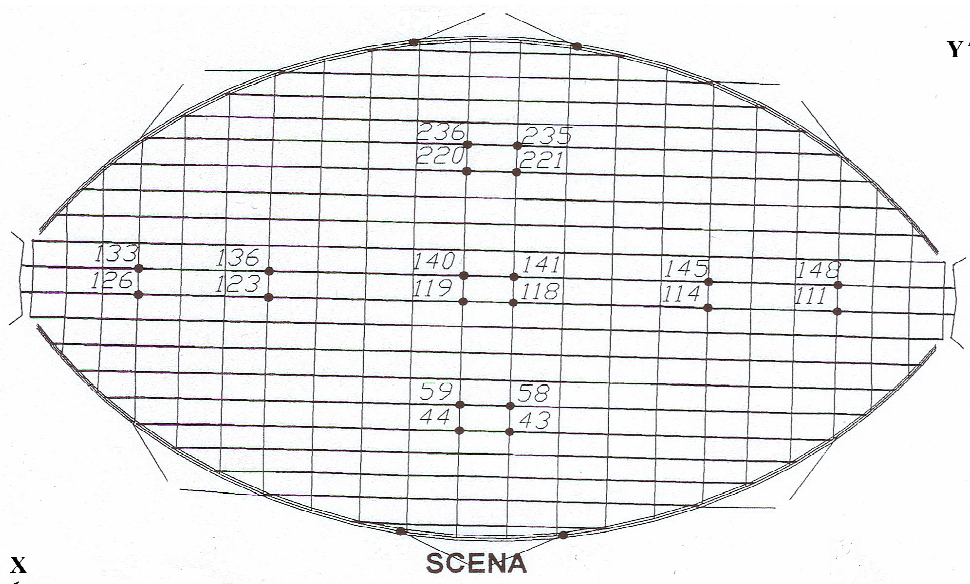
W celu okresowej rejestracji przemieszczeń, dla potrzeb bieżącego monitoringu wybranych węzłów konstrukcji przy obciążeniu śniegiem i lodem, wykonano i zamontowano na badanym obiekcie specjalne uniwersalne sygnały – tarcze (w sumie 38 sztuk). Przedstawione zostały one na rys. 4.



Rys. 4. Sygnały zamontowane na obiekcie amfiteatru: a) przyczółku żelbetonowym, b) ścianie sceny – jako punkty odniesienia, c) w wybranym punkcie konstrukcji przekrycia – jako punkt kontrolowany



Wyniki przeprowadzonych wcześniej pomiarów testowych [7] stanowiły podstawę do przyjęcia wymiarów oraz rysunku tarczy, a także wyboru konkretnej folii dalmierzej. Wielkość tarczy została ograniczona do wymiarów 85×85 mm odpowiadających jednemu z powtarzalnych detali konstrukcyjnych na którym miała być zamontowana. Czternaście tarcz umieszczonych na stałych elementach obiektu spełnia funkcję punktów odniesienia podczas obserwacji wykonywanych z dowolnie wybieranych stanowisk tachimetru, zaś pozostałe dwadzieścia cztery spełniają funkcje sygnałów roku w wybranych węzłach konstrukcji przekrycia (symetrycznie względem osi symetrii konstrukcji) zgodnie z sugestiami konstruktora (rys. 5). Pomiar sieci punktów odniesienia wykonano włączając do niej i wykorzystując jako punkty pomocnicze zastabilizowane wcześniej punkty sieci odniesienia. Włączenie tych punktów do sieci odniesienia umożliwia interpretację wszystkich wcześniej wykonywanych obserwacji – w oparciu o ten sam układ odniesienia. Wykorzystując założoną sieć punktów odniesienia i zanotowane sygnały tarczowe, przy obserwacjach okresowych metodą biegunową uzyskiwane są dokładności określenia położenia wybranego sygnału rzędu 1 cm [5, 7]. Niezbędne okazało się zastosowanie tachimetru wyposażonego w okular zenitalny jak również w dalmierz laserowy (RL) (jeżeli sygnał tarczowy jest obserwowany pod niekorzystnym kątem).



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów kontrolowanych na tle rzutu przekrycia amfiteatru

Pierwsze pomiary konstrukcji przekrycia obciążonego śniegiem podjęto dopiero w latach dziewięćdziesiątych. Brak wystąpienia w kolejnych latach większych opadów śniegu ograniczył możliwości pełniejszego wnioskowania o stanie konstrukcji pod obciążeniem śniegiem i praktycznie jedynym wnioskiem natury geometrycznej było stwierdzenie wystąpienia ugięcia o wartości 20 cm, w części środkowej konstrukcji, przy grubości warstwy śniegu 4 cm. W grudniu 2004 roku po wystąpieniu dużych opadów śniegu utrzymujące się niskie temperatury spowodowały zaleganie śniegu i lodu na konstrukcji przekrycia. Zaistniała potrzeba kolejnych pomiarów obiektu. Stwierdzono wówczas, że grubość pokrywy śnieżno-lodowej wynosiła około 36 cm na południowej części przekrycia, a miejscami nawet

ponad 70 cm na jego wschodniej części i w pobliżu przyczółka. Przemieszczenia pionowe konstrukcji w części środkowej osiągnęły 70 cm. Te dane, między innymi spowodowały, że od roku 2006 rozpoczęto systematyczne i dokładniejsze pomiary przemieszczeń węzłów konstrukcji przekrycia w miejscach punktów kontrolowanych, które uwidocznione są na rys. 5 oraz śniegu – grubości jego warstwy, rozkładu i ciężaru.

W okresie kilku ostatnich zim wykonano szereg pomiarów. Na szczególną uwagę zasługują pomiary z listopada 2008 roku, kiedy średnia grubość warstwy śniegu z lodem osiągnęła wartość 23 cm, a jej ciężar na 1 m<sup>2</sup> rzutu dachu 0.51 kN. W trakcie pomiaru temperatura wynosiła +1°C. Obliczone składowe wartości przemieszczeń w kontrolowanych punktach (rys. 5) w odniesieniu do stanu geometrycznego konstrukcji dachowej z listopada 2007 roku, kiedy to dach był nieobciążony i panowała zbliżona temperatura (+2°C), przedstawione są w tablicy 1.

Tablica 1. Składowe przemieszczeń w kontrolowanych punktach określone w wyniku pomiarów

Nr punktu	$u_x$ [cm]	$u_y$ [cm]	$u_z$ [cm]
221	1	0	-45
220	1	0	-45
235	1	0	-41
236	1	0	-41
118	1	0	-51
119	1	0	-51
141	1	0	-51
140	1	0	-51
58	1	0	-47
59	1	0	-47
43	1	0	-44
44	1	0	-43
126	10	0	21
133	10	0	21
123	4	0	-14
136	4	1	-15
114	-2	0	-16
145	-2	0	-16
111	-8	0	17
148	-8	0	18

Wartości przemieszczeń uzyskane w oparciu o wykonane pomiary charakteryzują się dość dobrą symetrią, co świadczy, że rozkład śniegu na dachu był w dostatecznym stopniu równomierny. Na szczególną uwagę zasługują wartości uzyskane dla punktów 126, 133 i 111, 148. Mają one przeciwny znak do pozostałych, co świadczy, że ich przemieszczenia skierowane są nie w dół, lecz do góry. Identyczny rezultat uzyskano na drodze obliczeń numerycznych.

#### 4. Obliczenia porównawcze

Pomierzona geometria konstrukcji wiszącej podtrzymująca dach amfiteatru w Koszalinie stwarza możliwość obliczeń numerycznych za pomocą programu ROBOT Millennium. Prawidłowe wykorzystanie programu uwarunkowane jest jednak uwzględnieniem sposobu sprężania konstrukcji – poprzez obrót łuków wokół osi przechodzącej przez przeguby.

Podczas projektowania przedmiotowej konstrukcji stwierdzono, korzystając z badań modelowych, że stan właściwego sprężenia uzyska się, gdy przemieszczenie pionowe środków łuków, przy ich obrocie, osiągnie wartość 25 cm, a siły w odciągach środkowych będą wynosiły 180 kN. W trakcie realizacji procesu sprężania konstrukcji okazało się, że takim siłom w odciągach odpowiadały przemieszczenia o wartości 28 cm.

Korzystając z programu obliczeniowego przeanalizowano trzy warianty pracy konstrukcji przy różnym rozkładzie obciążenia dachu śniegiem. Wariant 0 przedstawia rozwiązanie, w przypadku gdy śnieg pokrywa równomiernie powierzchnię dachu o wartości  $1 \text{ kN/m}^2$  rzutu dachu. Wartość ta odpowiada prawie w 100% wartości maksymalnej prognozowanej, o okresie powrotu 50 lat [8], rejestrowanej przez stację meteorologiczną Koszalin. Wariant I przedstawia rozwiązanie przy tym samym obciążeniu co w wariantie 0, za wyjątkiem pasma środkowego o szerokości 6 m wzdłuż osi podłużnej przekrycia, gdzie obciążenie nie występuje – założono, że ta część powierzchni dachu została odśnieżona. W wariantie II szerokość odśnieżonego pasma zwiększono do 12 m. Wartości obliczonych składowych przemieszczeń, w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, w punktach kontrolowanych (rys. 5), podano w tablicy 2.

Tablica 2. Obliczone wartości składowe przemieszczeń w kontrolowanych punktach

Nr punktu	Wariant 0			Wariant I			Wariant II		
	$u_x$ [cm]	$u_y$ [cm]	$u_z$ [cm]	$u_x$ [cm]	$u_y$ [cm]	$u_z$ [cm]	$u_x$ [cm]	$u_y$ [cm]	$u_z$ [cm]
221	1	2	-69	0	3	-63	0	4	-57
220	1	2	-65	1	3	-59	1	4	-53
235	1	2	-65	1	3	-61	1	5	-58
236	1	2	-63	1	4	-59	1	5	-56
118	1	0	-78	0	0	-55	0	0	-38
119	1	0	-74	1	0	-50	1	0	-32
141	1	0	-79	0	0	-55	0	0	-39
140	1	0	-74	1	0	-50	1	0	-32
58	0	-2	-74	0	-3	-65	0	-3	-55
59	0	-2	-70	0	-3	-61	0	-3	-51
43	0	-2	-69	0	-3	-62	0	-4	-55
44	0	-2	-65	0	-3	-59	0	-4	-52
126	13	1	23	12	1	24	10	1	23
133	13	1	22	11	1	23	9	1	22
123	5	0	-35	4	0	-21	4	0	-11
136	4	1	-35	4	1	-21	4	1	-11
114	-4	-1	-30	-5	-1	-15	-5	-1	-6
145	-4	0	-31	-5	0	-16	-5	0	-6
111	-13	-1	25	-12	-1	26	-10	-1	25
148	-13	0	24	-11	0	26	-10	0	25

## 5. Uwagi końcowe

Przedstawione w pracy problemy mają istotne znaczenie w analizie statycznej konstrukcji wiszących. Przeważnie geometria tych konstrukcji po sprężeniu nie jest udokumentowana. Stwarza to dość duże trudności, gdy zachodzi potrzeba przeprowadzenia analiz od obciążeń eksploatacyjnych, przy użyciu programów komputerowych. Najbardziej właściwym podejściem jest wówczas określenie geometrii konstrukcji na drodze pomiarów geodezyjnych, jak to miało miejsce dla przedmiotowej konstrukcji.

Usunięcie śniegu z dachu przekrycia o dużej powierzchni, jak nadmieniono już we wprowadzeniu, nie jest łatwym zadaniem, wręcz niemożliwym do zrealizowania przy „ręcznym podejściu” – trudno sobie wyobrazić aby można było usunąć ponad 300 ton śniegu z dachu używając tylko łopat. Dlatego też, aby nie dopuścić do awarii lub katastrofy budowlanej rozpatrzono warianty częściowego usunięcia śniegu z dachu wzdłuż pasów podłużnych o szerokości 6 m i 12 m przy użyciu specjalnych wózków. O konieczności usunięcia śniegu z dachu informują pomierzone i obliczone wartości przemieszczeń w punktach kontrolowanych (patrz tablica 2).

Należy ponadto nadmienić, że interesujące jest zachowanie omawianej konstrukcji przy obciążeniu śniegiem. Dość dużym przemieszczeniom – ugięciom w partii środkowej – towarzyszą istotne przemieszczenia o przeciwnym znaku w partiach skrajnych, w pobliżu przyczółków. Zjawisko to jest wynikiem relatywnie małej sztywności głównych łuków nośnych. Korzystnie wpływa ono na zachowanie się cięgien napinających wykonanych z kształtowników IPN-140 o istotnej sztywności na zginanie, nie powoduje ich wybożenia i doprowadza do samosprężenia konstrukcji wiszącej. Te zagadnienia są obecnie przedmiotem dalszych szczegółowych analiz.

## Literatura

1. Filipkowski J.: Przekrycie amfiteatru w Koszalinie, Inż. i Bud., nr 7/1977.
2. Filipkowski J.: Construction of suspended roof over open-air theatre in Koszalin, International Conference on the Behaviour of Slender Structure, 14-16 September, London 1977 and Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 1, 1977.
3. Filipkowski J.: Hängedach des Freilichttheaters in Koszalin (Polen), Acier – stahl – steel 7-8/1977.
4. Filipkowski J.: Couverture suspendue le théâtre de plein-air de Koszalin, Pologne, Special Congress UIA Architecture Mexicaine 1968÷1978, Techniques et Architecture no 320 structures spatiales 2.
5. Deska K.: Metodyka rejestracji struktury geometrycznej przekryć budowlanych na potrzeby diagnostyczne, Rozprawa doktorska, WGiGP UWM w Olsztynie, Olsztyn 2010.
6. Deska K., Pawłowski W.: Registration of geometrical structure of a large-span suspended roof for diagnostic purposes. Reports on Geodesy. Proceedings of the 9th Scientific-Technical Conference „Current problems of engineering surveying”, Warsaw-Białobrzegi, Poland, 26-27 March 2009, Politechnika Warszawska, Warszawa 2009.
7. Deska K., Pawłowski W.: Badania doświadczalne z zakresu sposobu sygnalizacji punktów przekryć wiszących na potrzeby pomiarów diagnostycznych, ZN Politechniki Łódzkiej, Budownictwo nr 56, Wyd. PŁ, Łódź 2007.
8. Żurański J.A., Sobolewski A.: Obciążenie śniegiem w Polsce, Wyd. Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2009.