

Propozycje zastosowania układów prętowo-ciężnowych w konstrukcjach budowlanych

Proposals of applications of tension-strut systems in building structures

JANUSZ RĘBIELAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.79>

Układy prętowo-ciężnowe należą do najbardziej ekonomicznych rodzajów systemów konstrukcyjnych. Ich elementy składowe poddane są działaniu albo sił ściskających, albo sił rozciągających. Wstępne sprężenie jest warunkiem koniecznym do funkcjonowania tych układów. Dzięki temu odznaczają się one stosunkowo dużą sztywnością oraz wymagają użycia względnie niewielkiej ilości materiału konstrukcyjnego niezbędnego do ich zbudowania. Najczęściej są stosowane w konstrukcjach mostów wiszących lub podwieszonych oraz jako struktury nośne lekkich przekryć dachowych, zwłaszcza o dużej rozpiętości. Współcześnie formuła konstrukcyjna układów prętowo-ciężnowych jest coraz szerzej stosowana m.in. w systemach dużych ścian osłonowych i budynkach wielopiętrowych, a także jest proponowana w konstrukcjach fundamentów. Artykuł przedstawia kilka wybranych postaci takich konstrukcji, opracowanych przez autora do różnych celów użytkowych. Złożoność takich struktur sprawia, że podczas ich projektowania i wznoszenia na placu budowy konieczne jest wykorzystanie odpowiednich metod numerycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: układ konstrukcyjny, struktura prętowo-ciężnowa, przekrycie dachowe, fundament, model numeryczny

Tension-strut systems belong to the most economic types of structural systems. Component parts are subjected to act only of compression forces or they are subjected to act only of tension forces. Suitable pre-stressing is the necessary condition of their proper operational use. Due to this feature they are of relatively big spatial stiffness and they require relatively small consumption of materials needed to their construction. They are mostly applied in bearing structures of hanging or suspension bridges and in support systems of the lightweight roof covers, particularly of big spans. Construction formula of the tension-strut systems is nowadays widely applied in structures of the large curtain walls, in support structures of multi-story buildings and it is proposed to use in the foundation structures. The paper presents some selected types of such structures worked out by the author for various useful purposes. Complexity of these structures requires application of appropriate numerical methods during processes of the design and of the assembly stage in the building site.

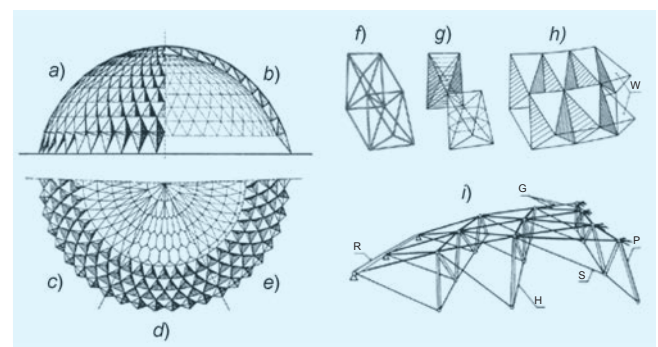
KEYWORDS: structural system, tension-strut structure, roof cover, foundation, numerical model

Ciążar własny typowych konstrukcji przekryć dachowych, wykonywanych np. jako standardowe systemy belkowe lub kratownicowe, stanowi istotną część wartości obciążeń stałych, rozważanych podczas procesów projektowania. Wraz ze wzrostem rozpiętości przekrycia udział ciężaru własnego tego rodzaju konstrukcji znacząco

wzrasta [1–4]. Ponieważ elementy poddawane zginaniu lub ściskaniu mają stosunkowo duże pola powierzchni przekrojów poprzecznych, dlatego ich masy własne również muszą być odpowiednio duże. Elementy poddane działaniu rozciągania osiowego wymagają niewielkich przekrojów poprzecznych do bezpiecznego przekazywania tego rodzaju sił (nawet o dużych wartościach), dlatego zazwyczaj są bardzo lekkie. System konstrukcyjny złożony wyłącznie z elementów rozciąganych jest zatem lekkim i ekonomicznym układem nośnym. Za najbardziej efektywne uważa się konstrukcje przekryć mające formę powierzchni minimalnej, co oznacza, że w każdym punkcie konstrukcji lokowanej na takiej powierzchni działają siły rozciągające mające jednakową wartość we wszystkich kierunkach [5]. Przekrycia dachowe zaprojektowane za pomocą takich systemów konstrukcyjnych często mają bardzo interesującą formę architektoniczną, jednak biorąc pod uwagę cel użytkowy, nie zawsze mogą być zastosowane. Dążenie do ograniczenia kosztów eksploatacji obiektów zamkniętych o dużych kubaturach i rozpiętościach dachów skłoniły projektantów do poszukiwania nowych rodzajów systemów kopuł, które mogą mieć niewielkie wyniosłości [2, 6, 7]. Kopuły kablowe D. Geigera należą do grupy struktur prętowo-ciężnowych, które mogą mieć ekstremalnie małe strzałki. Jako lekkie systemy konstrukcyjne są obecnie często wykorzystywane w roli konstrukcji nośnych dachów o dużych rozpiętościach i są wznoszone nad kołowymi bądź owalnymi formami rzutu podstawy.

Krystaliczna struktura prętowo-ciężnowa

Jedną z tego typu konstrukcji, opracowanych przez autora, jest krystaliczna struktura prętowo-ciężnowa [8, 9], której etapy kształtowania przedstawiono na rys. 1. Podstawą była odpowiednia sferyczna postać krystalicznej struktury przestrzennej o budowie pokazanej na rys. 1a–e.

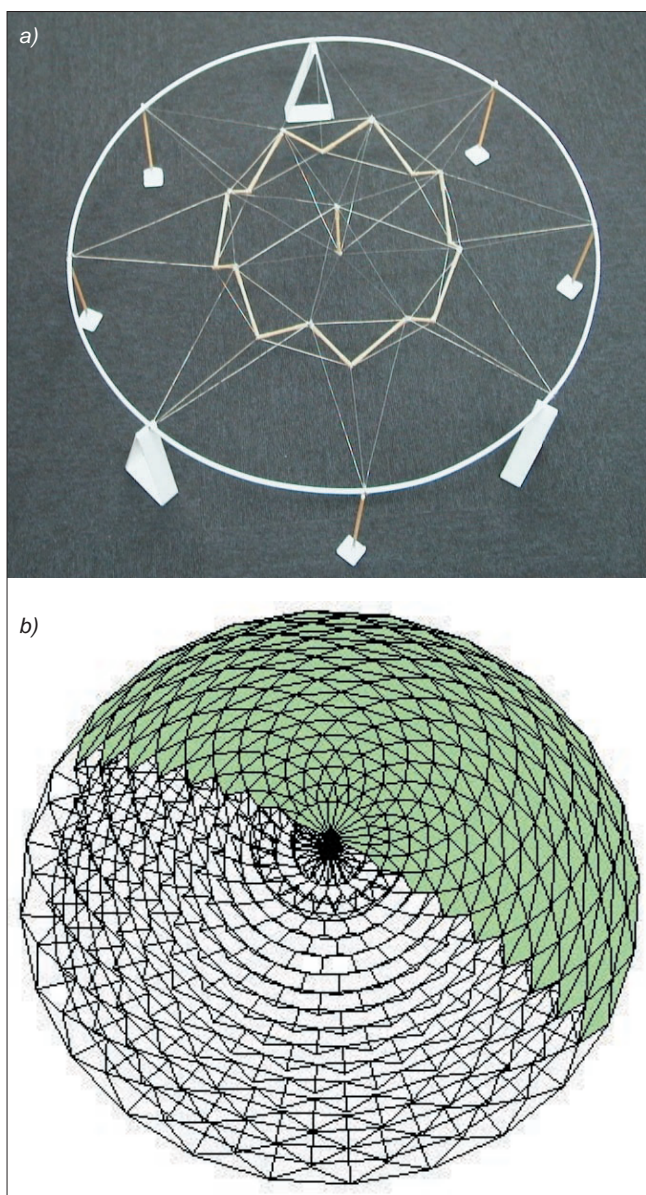


Rys. 1. Schematy kształtowania krystalicznej struktury prętowo-ciężnowej: a) fragment elewacji, b) fragment przekroju poprzecznego kopuły, c) pręty warstwy górnej, d) układ krzyżulców, e) pręty warstwy górnej, f) układ modułów prętowych, g) panele trójkątne, h) lokalizacja paneli okiennych, i) schemat budowy krystalicznej struktury prętowo-ciężnowej

* Prof. dr hab. inż. arch. Janusz Rębielak (j.rebielak@wp.pl) – Politechnika Krakowska, Wydział Architektury, Instytut Projektowania Budowlanego (A-4), Pracownia Konstrukcji Budowlanych (A-44)

Schemat układu bryłowego tej struktury, złożony z modułów ośmio- i czworościennych, pokazano na rys. 1f. Korzystne warunki oświetlenia wnętrza takiej kopuły prętowej uzyskano przez rozmieszczenie lekkich paneli trójkątnych na odpowiednich ścianach modułów ośmiościennych (rys. 1g) oraz paneli okiennych (W) w co drugim polu trójkątnym zewnętrznej warstwy prętów sferycznej postaci przekrycia. Ostateczną formę krystalicznej struktury pręto-ciągnowej uzyskano dzięki zmianie statusu większości elementów składowych oraz redukcji liczby wybranej grupy elementów (rys. 1i). Przyjęto, że większość elementów będą stanowiąc cięgna, które w warstwie górnej (G) tworzą siatkę trójkątną. Nieliczne pręty (P) są krzyżulcami znajdującymi się w kolejnych pierścieniach koncentrycznych (H), które również są ze sobą połączone za pomocą odpowiednich cięgien ukośnych (S). Całość struktury jest połączona za pomocą odpowiednich cięgien z węzłami podporowymi, równomiernie rozmieszczonymi w obwodowym pierścieniu ściskającym (R). Model fizyczny najprostszej postaci takiego systemu pokazano na rys. 2a.

Struktury budowane w proponowany sposób mają większą stabilność przestrzenną i są łatwiejsze do montażu



Rys. 2. Model fizyczny najprostszej postaci krystalicznej struktury pręto-ciągnowej (a) oraz wizualizacja modelu numerycznego bardziej złożonej formy tej struktury (b)

w porównaniu z typowymi kopułami kablowymi D. Geigera. Układy projektowane dla konstrukcji przekryć o dużych rozpiętościach muszą się składać z co najmniej kilku pierścieni wewnętrznych, a to wymaga opracowania skomplikowanego zestawu danych technicznych – ich przygotowanie jest znacznie ułatwione dzięki opracowaniu odpowiedniego modelu numerycznego projektowanego obiektu. Dalej podano treść programu o nazwie ProgramQ, napisanego w języku programowania Formian [10]. Program ten definiuje model numeryczny złożonej postaci krystalicznej struktury pręto-ciągnowej, zaprojektowanej jako konstrukcja kopuły o niewielkiej strzałce rozpiętej nad rzutem kołowym o formie podobnej do przedstawionej na rys. 1i. W części tej wizualizacji pokazano lokalizacje membran rozmieszczonych w trójkątnych polach warstwy górnej tej konstrukcji.

ProgramQ

```

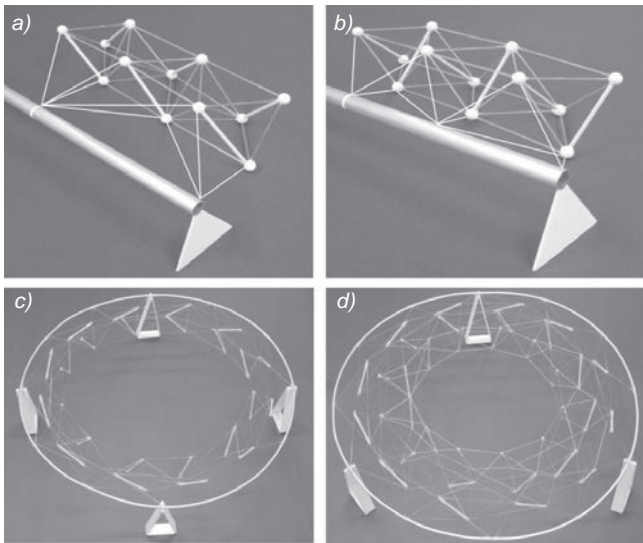
01. n=14;(*)Parametr określający ilość podziałów
    w kierunku promieniowym(*)
02. m=24;(*)Parametr geometryczny określający ilość
    podziałów w kierunku obwodowym(*)
03. R=18;(*)Wielkość promienia warstwy górnej kopu-
    ły(*)
04. PPZ=[R,0,0;R-1,0,0];(*)Lokalizacja pręta pionowe-
    go w zworniku kopuły(*)
05. PZW=rin(2,m,2)|{[R,1,0;R,1,1],[R-
    -1,0,0;R,1,1],[R,1,1;R-1,2,0]};
06. a=PPZ#PZW;
07. P1=lam(2,1)|{[R-1,0,1;R,1,1],[R,0,2;R,1,1],
    [R-1,0,1;R,0,2],[R,0,2;R-1,1,2]};
08. P2={|[R-1,0,1;R-1,2,1],[R,1,1;R,3,1],[R,0,2;R,2,2],
    [R-1,1,2;R-1,3,2]};
09. PP1=P1#P2;
10. np=n+1;
11. n2=np/2;
12. Band1=rinit(m,n2,2,2)|PP1;
13. DDA=tran(2,1)|tran(3,1)|PP1;
14. Band2=rinit(m,n2-1,2,2)|DDA;
15. EndRing=tran(3,n)|rin(2,m,2)|{[R,0,1;R,1,2],
    [R,1,2;R,2,1],[R-1,1,1;R,1,2],
    [R,1,2;R,3,2]};
16. A=pex|PPZ#PZW#Band1#Band2#EndRing;
17. Pan1={|[R,0,2;R,1,1;R,2,2],[R,2,2;R,3,1;R,1,1]};
18. Panel1=rinit(m/2,n2,2,2)|Pan1;
19. Pan2=ref(3,2)|Pan1;
20. Panel2=rinit(m/2,n2-1,2,2)|Pan2;
21. Panel3=rin(2,m/2,2)|[R,3,1;R,1,1;R,1,0];
22. EndPanel=tran(3,n-1)|rin(2,m/2,2)|{[R,0,2;R,1,3;R,
    2,2],[R,2,2;R,1,3;R,3,3]};
23. Panel=Panel1#Panel2#Panel3#EndPanel;
24. B=Panel#A;
25. SXP=bt(1,0.5,3)|B;
26. KopulaQ=bs(1,360/m,5/n)|SXP;
27. use&,vt(2),lw(0.25),vm(2),c(1,1),c(3,39),
    vh(200,300,-220,0,0,0,0,0,1);
28. draw KopulaQ;

```

Używanie numerów porządkowych do oznaczania kolejności wierszy w dawnej wersji programu Formian było zabronione, natomiast w jego najnowszym wydaniu jest zalecane. Dzięki stosowaniu wybranych parametrów projektant może dostosowywać kształt struktury do zmieniających się wymagań projektowych, co znacznie przyspiesza proces projektowania i ułatwia współpracę między głównymi uczestnikami całego procesu inwestycyjnego.

Propozycje innych form struktur prętowo-ciężnowych

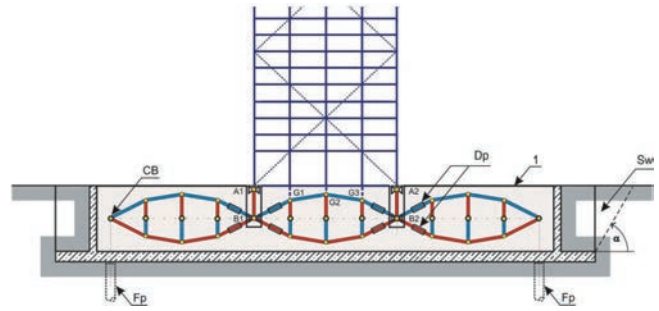
Formuła konstrukcyjna polegająca na założonym podziale elementów konstrukcji na takie, które mogą przejmować wyłącznie siły rozciągające lub tylko ściskające, zakłada konieczność wstępnej sprężenia całego systemu. Aby konstrukcja mogła spełniać przyjęte założenia, należy odpowiednio zaplanować wzajemne usytuowanie elementów ściskanych i rozciąganych oraz sposoby ich połączenia. W przypadku płaskich systemów prętowo-ciężnowych zadanie to jest stosunkowo proste, jednak dla układów przestrzennych zazwyczaj się komplikuje. Pomocna jest wtedy analiza rozmieszczenia poszczególnych elementów w wybranych formach modułów przestrzennych. Pręty sztywne są lokowane wewnątrz przyjętych brył modułów konstrukcyjnych lub na wybranych krawędziach takich modułów, które zwykle przyjmują formy najprostszyc wielościanów – czworościanu oraz ośmiościanu. Specyficzny rodzaj tak budowanych systemów konstrukcyjnych jest określany mianem *tensegrity*, a ich powstanie zapoczątkowały prace K. Snelsona oraz R.B. Fullera [11, 12]. Określona grupa takich systemów może być utworzona za pomocą przestrzennych, pasmowych struktur prętowo-ciężnowych, złożonych z modułów czworościennych (rys. 3a–b). Te struktury pasmowe są następnie sytuowane równoległe do obwodowego pierścienia ściskanego na coraz wyższych poziomach (rys. 3c–d). Całość takiej konstrukcji przestrzennej jest odpowiednio wstępnie sprężona i zamocowana w obwodowym pierścieniu ściskanym [13].



Rys. 3. Modele fizyczne przykładowych postaci struktur prętowo-ciężnowych złożonych z koncentrycznych, pasmowych pierścieni przestrzennych

Koncepcja konstrukcyjna struktury prętowo-ciężnowej została zastosowana w elementach składowych systemu fundamentu zespolonego, nazwanych układami pośrednimi (rys. 4) [14]. Układy pośrednie mają kształt tzw. dźwigarów soczewkowych i są umieszczane np. w wąskich przestrzeniach między dwiema równoległymi do siebie belkami głównymi (1).

Dzięki formie konstrukcyjnej dźwigara soczewkowego fundament zespolony ma zdolność tłumienia drgań spowodowanych wpływami sejsmicznymi. Ta własność może zostać wzmocniona przez rozmieszczenie w wybranych elementach dźwigara np. sterowanych komputerowo siłowników hydraulicznych (D_p). Stabilność stref brzegowych całej konstrukcji można zapewnić przez ich odpowiednie dociążenie ciężarem gruntu znajdującego się w odpowiednim klinie odłamu (Sw) lub przez zasto-



Rys. 4. Schemat przekroju pionowego przykładowej formy systemu fundamentu zespolonego

sowanie dodatkowych pali (F_p) zaprojektowanych bezpośrednio poniżej węzłów krawędziowych (CB). Taka postać fundamentu umożliwi posadzenie obiektów silnie obciążonych na gruntach o niewielkiej nośności. Układ soczewkowy pokazany na rys. 4 może być inspiracją do zaprojektowania nowych i bardzo efektywnych rodzajów dźwigarów zespolonych.

Wnioski

Konstrukcje prętowo-ciężnowe należą obecnie do najbardziej efektywnych ekonomicznie i wydajnych materiałowo systemów nośnych stosowanych w architekturze i budownictwie. Odznaczają się bardzo dużą elastycznością w procesach kształtowania, co sprawia, że ich potencjał rozwojowy jest stale oceniany jako bardzo duży, o czym mogą świadczyć przykłady przytoczone w tym artykule. Stosowanie odpowiednich modeli numerycznych tych niekiedy bardzo złożonych układów konstrukcyjnych istotnie ułatwia procesy ich projektowania, wznoszenia i późniejszej eksploatacji.

LITERATURA

1. Makowski Z.S. "Analysis, design and construction of double-layer grids". London: Applied Science Publishers, 1981.
2. Allen E., Zalewski W., Boston Structures Group. "Form and forces. Designing efficient, expressive structures". Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
3. Berger H. "Light structures – structures of light: the art and engineering of tensile architecture". Basel, Switzerland: Birkhäuser Verlag, 1996.
4. Schlaich J. "On some recent lightweight structures". *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 43, 2 (2002): s. 69–79.
5. Otto F. "Natürliche Konstruktionen". Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1982.
6. Geiger D.H. "Roof structure". United States Patent, Patent No. 4,736,553, 12 April 1988.
7. Geiger D.H., Stefaniuk A., Chen D. "The design and construction of two cable domes for the Korean Olympics". *Proceedings of the IASS Symposium on Shells, Membranes and Space Frames*. Osaka, Japan, 1986, s. 265–272.
8. Rębielak J. "Simple form of structural system proposed for cable domes". *Lightweight Structures in Civil Engineering*. Local Seminar of IASS Polish Chapter, Warsaw-Wrocław, 7th December, 2001, s. 56–58.
9. Rębielak J. "Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems". Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
10. Nooshin H., Disney P. "Formex configuration processing III". *International Journal of Space Structures*. 16, 1 (2001): s. 1–56.
11. Snelson K. "Snelson on the tensegrity invention". *International Journal of Space Structures*. Special issue on *Morphology and Architecture*. Guest editor: H. Lalvani. 11, 1&2 (1996): s. 43–48.
12. Fuller R.B. "Tensile-integrity structures". US Patent No. 3,063,521, November, 1962.
13. Rębielak J. "Basic groups of structural systems of cable domes shaped by means of tetrahedral modules". *Lightweight Structures in Civil Engineering*. Local Seminar of IASS Polish Chapter, Warsaw-Wrocław, 7th December, 2001, s. 64–67.
14. Rębielak J. "Proposals of application of system of combined foundation for buildings located in earthquake areas and in sea bays". *Iranian Journal of Structural Engineering*. 2, 1 (2015): s. 48–54. ■