

Optimalizacja z uwagi na kryterium minimalnego kosztu konstrukcji czworokątnego słupa skratowanego, złożonego z przekrojów rurowych

Minimum cost design of a square braced tubular column

József Farkas¹, Károly Jármai²

*Uniwersytet Miskolc, Węgry, Instytut Logistyki, H-3515 Miskolc Egyetemváros
University of Miskolc, Hungary, Institute of Logistics H-3515 Miskolc Egyetemváros
e-mail: ¹altfar@uni-miskolc.hu
e-mail: ²altjar@uni-miskolc.hu*

Streszczenie

Słup wspornikowy jest obciążony pionową siłą ściskającą i siłą poziomą oddziaływanymi na jego wierzchołek. Zarówno pręty krawężnikowe (krawężniki) słupa jak i skratowanie czterech płaszczyzn ścian oraz przepony wykonane są z kształtowników o przekroju rurowym okrągłym (CHS). Wszystkie pręty skratowania połączone są z krawężnikami słupa węzłami zakładkowymi typu K. Przy projektowaniu słupa na wyoboczenie globalne należy uwzględnić wpływ siły ścinającej (deformacje skratowania), powstający w trakcie wyoboczenia. Pręty skratowania są projektowane z uwzględnieniem tej siły ścinającej. Węzły spawane zakładkowe typu K są projektowane na lokalne uplastycznienie i ścinanie prętów skratowania. Zmienne projektowe podlegające optymalizacji to: wymiary kształtowników CHS krawężników słupa, skratowań i przepon, a także odległość pomiędzy prętami krawężnikowymi słupa i rozstaw węzłów typu K. Określone są specjalne ograniczenia wykonawcze, by umożliwić wykonanie złączy spawanych. Funkcja kosztu podlegająca minimalizacji zawiera koszt materiału, cięcia i szlifowania końców prętów CHS, spawania krawężników słupa i skratowania, a także malowania. Optymalne wartości znajduje się drogą systematycznego przeszukiwania z użyciem algorytmu opracowanego w programie MathCAD.

Abstract

A cantilever column is loaded by a compression and horizontal force acting on the top of the column. The column is constructed with four main circular hollow section (CHS) tubes, which are connected by CHS bracings in all four plans and with diaphragms. The bracings are constructed as trusses with welded overlap K joints. In the constraint on overall column buckling the effect of shear force (deformation of bracing) should be taken into account, which arises during the buckling. The bracings are designed for this shear force. The welded overlap K joints of bracings are checked on local yielding and brace shear. The unknowns to be optimized are as follows: CHS profile dimensions of the main tubes, tubular braces and diaphragms as well as distance between the main tubes and distances of K joints. Special fabrication constraints are formulated to make it possible the welding of joints. The cost function to be minimized contains the cost of material, cutting and grinding of CHS strut ends, welding of the main tubes and bracings as well as painting. The optima are found by a systematic search using a MathCAD algorithm.

1. Wstęp

Słupy są ważnymi elementami konstrukcji budynków przemysłowych, stadionów sportowych i tymczasowych pomostów [1]. Można stosować różne przekroje poprzeczne słupów. Często stosuje się rury ze względu na ich dużą stateczność. W niniejszej pracy cztery pręty krawężnikowe słupa i skratowanie wykonane są z kształtowników rurowych o przekrojach poprzecznych okrągłych (CHS) (Rys. 1,2,3,4).

Słup wspornikowy o wysokości 30 m jest obciążony siłą ściskającą $F = 2 \times 10^6$ [N] i siłą poziomą $H = 0.1F$. Słupy kratowe zachowują się jak elementy złożone, wpływ siły ścinającej przy wyoboczeniu (deformacje skratowania) uwzględniono zgodnie z Eurokodem 3 [2]. Pręty skratowania są wykonane z kształtowników CHS i są łączone w spawanych węzłach zakładkowych typu K.

Zmienne projektowe podlegające optymalizacji to: wymiary kształtowników CHS krawężników słupa (D_0, t_0), prętów skratowania (d_1, t_1) i przepon (d_2, t_2), odległość pomiędzy gałęziami słupa (h_0), liczba odstępów (q) (odległości pomiędzy węzłami typu K).

1. Introduction

Columns are important parts of industrial buildings, sport stadiums and provisional stages [1]. Various cross-sections can be used for them. Tubes are often used for their large stability. In the present study the column is constructed with four main circular hollow section (CHS) tubes and CHS bracings (Figs 1,2,3,4).

A 30 m high cantilever column is loaded by a compression force of $F = 2 \times 10^6$ [N] and a horizontal force $H = 0.1F$. The truss columns work as a built-up members, the effect of shear force during the buckling (deformation of bracing) is considered according to Eurocode 3 [2]. The bracings are constructed from CHS as trusses with welded overlap K joints.

Unknowns to be optimized are as follows: CHS profile dimensions of the main tubes (chords) (D_0, t_0), tubular bracings (d_1, t_1) and diaphragms (d_2, t_2), distance between chords (h_0), number of spacings (q) (distances between K joints).

2. Warunki optymalizacji

W procesie optymalizacji muszą być spełnione następujące ograniczenia: globalne i lokalne wyoboczenie prętów krawężnikowych i prętów skratowania z CHS, nośność węzłów typu K zakładkowych, zgodnie z zasadami projektowania ISO-IIW dla statycznie obciążonych złączy kształowników rurowych [6] (lokalne uplastycznienie nachodzących na siebie prętów skratowania, lokalne uplastycznienie pasa i ścinanie prętów wykratowania). Grubości ścianek kształowników CHS są dobierane z uwagi na warunek smukłości ścianki $d/t \leq 50$.

Sformułowane są specjalne ograniczenia wykonawcze, by umożliwić wykonanie złączy spawanych: kąty pomiędzy prętami krawężnikowymi a prętami skratowania winny wynosić co najmniej 30° , jak również odległości pomiędzy końcami prętów skratowania i przepon w węzłach winny wynosić co najmniej $2t$ (t jest grubością ścianek prętów skratowania lub przepon).

3. Funkcja kosztu

Funkcja kosztu podlegająca minimalizacji zawiera koszt materiału, cięcia i szlifowania końców prętów CHS, spawania gałęzi krawężnikowych i skratowania a także malowania [3,4,5].

2. Constraints in the optimization

The following constraints should be fulfilled: overall and local buckling of CHS chords and bracings, strength of overlap K joints according to ISO-IIW design rules for statically loaded hollow section joints [6] (local yielding of overlapping brace, local chord yielding and brace shear). The CHS profile thicknesses are selected taken into account the local buckling constraint $d/t \leq 50$.

Special fabrication constraints are formulated to make it possible the welding of joints: the angle between chords and bracing struts should be minimum 30° as well as the distance between strut ends in joints of chords, bracings and diaphragms should be minimum $2t$ (t is the thickness of bracings or diaphragms).

3. Cost function

The cost function to be minimized contents the cost of material, cutting and grinding of CHS strut ends, welding of chords and joints as well as painting [3,4,5].

<p>Rys.1. Schemat słupa skratowanego Fig.1. A braced column</p>	<p>Rys.2. Odcinek słupa skratowanego Fig.2. A part of the square column</p>	<p>Rys.3. Przekrój poprzeczny słupa Fig.3. Cross section of the column</p> <p>Rys.4. Dane geometryczne skratowania Fig.4. Geometric data of the bracing</p>

Koszt spawania jest wyrażony ogólnym wzorem

The general formula for the welding cost is as follows

$$K_w = k_w \left(C_l \Theta \sqrt{\kappa \rho V} + 1.3 \sum_i C_{wi} a_{wi}^n C_{pi} L_{wi} \right) \quad (1)$$

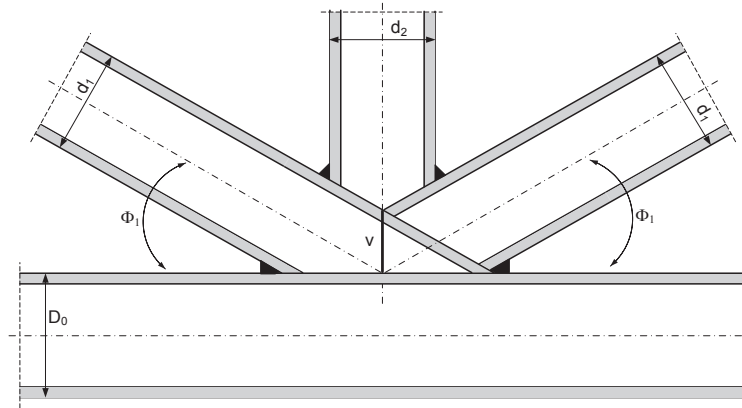
gdzie k_w [\$/min] jest współczynnikiem kosztów spawania, C_l jest współczynnikiem montażu, przyjmowanym zwykle jako $C_l = 1 \text{ min/kg}^{0.5}$, Θ jest współczynnikiem wyrażającym złożoność montażu, pierwszy człon wylicza czas montażu, κ jest liczbą elementów konstrukcyjnych, które należy połączyć, ρV jest masą zmontowanej konstrukcji, drugi człon daje oszacowanie czasu spawania, C_w i n są stałymi charakteryzującymi zastosowaną technologię spawania i typ spoiny, C_p jest współczynnikiem pozycji spawania (1 dla spawania podłownego, 2 dla pionowego, 3 dla spawania pułapowego). L_w jest długością spoiny, współczynnik 1.3 uwzględnia dodatkowe czasy spawania (oczyszczanie, odbijanie żuźla, wymiana elektrody). Wzór na koszt cięcia i szlifowania końców głównych kształtowników CHS ma postać

where k_w [\$/min] is the welding cost factor, C_l is the factor for the assembly usually taken as $C_l = 1 \text{ min/kg}^{0.5}$, Θ is the factor expressing the complexity of assembly, the first member calculates the time of the assembly, κ is the number of structural parts to be assembled, ρV is the mass of the assembled structure, the second member estimates the time of welding, C_w and n are constants given for the specified welding technology and weld type, C_p is the factor of welding position (for downhand 1, for vertical 2, for overhead 3). L_w is the weld length, the multiplier 1.3 takes into account the additional welding times (deslagging, chipping, changing the electrode). The formula of the cost of cutting and grinding of CHS chord ends

$$K_{CG} = \frac{2.5\pi d}{(350 - 2t)0.3 \sin \Phi} \quad (2)$$

Tabela 1. Wyniki optymalizacji. Koszty K w \$. Wartość optymalna wyróżniona przez pogrubienie.
Table 1. Optimization results. Costs K are in \$. Optimum is marked by bold letters.

Kształtowniki prętów krawężnikowych słupa Chord profile	q	4	5	6
273.0x8 mm	K	20080	19940	20560
323.9x8 mm	K	21850	22100	22740



Rys.5. Węzeł spawany typu K zakładkowy. Pręty wykratowania i przepony rurowe
Fig.5. Welded overlap K joint. Tubular braces and diaphragm

4. Wyniki optymalizacji

Minima znajduje się drogą systematycznego przeszukiwania z użyciem algorytmu opracowanego w programie MathCAD. Koszt konstrukcji oblicza się dla wybranych kształtowników CHS gałęzi i prętów skratowania oraz dla wartości $q = 4-6$. Wyniki optymalizacji pokazano w Tabeli 1.

Wartość optymalną dla kształtownika 323.9x8 zaznaczono kursywą. Koszt wzrasta ze wzrostem wielkości kształtownika rury głównej, tak więc większe kształtowniki rur głównych nie dają minimum kosztu. Słupów dla kształtowników mniejszych niż 273.0x8, a także dla q poniżej $q = 4$ nie można wykonać.

4. Results of optimization

The minima are found by a systematic search using a MathCAD algorithm. The cost is calculated for selected chord and brace CHS profiles and for $q = 4-6$ values. Table 1. shows the results of the optimization.

Optimum for profile 323.9x8 is marked by italics. Cost increases with increasing of chord profile, thus, larger chord profiles do not give cost minimum. Columns for profiles smaller than 273.0x8 as well as columns for smaller than $q = 4$ cannot be realized. All the optima fall in the range of $q = 4-5$. Thus, it is enough to investigate the cases given in Table 1.

Wszystkie optima znajdują się w zakresie $q = 4-5$. Wystarczy więc badać przypadki podane w Tabeli 1.

Dane optymalnej konstrukcji: $q = 5$, $h_0 = 3510$ mm, $D_0 \times t_0 = 273.0 \times 8$, $d_1 \times t_1 = 114.3 \times 4$. Całkowita objętość $V_4 = 1.080 \times 10^9$ mm³.

5. Węzły wykratowania

Spawane węzły zakładkowe typu K (Rys. 5) prętów skratowania są sprawdzane z uwagi na lokalne uplastycznienie i ścinanie prętów skratowania.

6. Porównanie ze słupem w postaci pojedynczej rury

Optymalne wymiary przekroju rurowego w analizowanym przypadku to $D = 2600$ mm i $t = 45$ mm. Objętość materiału tej rury wynosi $V = AL = 11,03 \times 10^9$ mm³. Porównanie tej objętości z objętością optymalnego słupa pełnościennego o przekroju poprzecznym kwadratowym prowadzi do wniosku, że masa słupa z pojedynczego przekroju rurowego jest 10 razy większa od masy czworokątnego słupa złożonego, również z przekrojów rurowych.

Data of the optimum structure: $q = 5$, $h_0 = 3510$ mm, $D_0 \times t_0 = 273.0 \times 8$, $d_1 \times t_1 = 114.3 \times 4$. The total volume $V_4 = 1.080 \times 10^9$ mm³.

5 Joints of bracings

The welded overlap K joints of bracings (Fig.5) are checked on local yielding and brace shear.

6. Comparison with the column from a single tube

The optimum tube dimensions in our case are $D = 2600$, $t = 45$ mm. The volume of this tube is $V = AL = 11.03 \times 10^9$ mm³. Comparing this volume to the volume of the optimal square tubular column, it can be concluded, that the mass of the single tube is 10 times larger than that of square tubular column.

Podziękowania

Badania były wspierane przez projekt priorytetowy TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 zatytułowany „Krajowy program doskonałości – Rozwój i wykorzystanie systemu wsparcia personelu krajowego dla studentów i pracowników naukowych” wdrażany w ramach programu konwergencji, wspieranego przez Unię Europejską, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Społeczny. Badania były również wspierane przez projekt T 109860 Węgierskiego Funduszu Badań Naukowych OTKA i były częściowo prowadzone w ramach Centrum Doskonałości Innowacyjnego Projektowania Technicznego i Technologii Uniwersytetu Miskolc.

Acknowledgements

The research was supported by the TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 priority project entitled ‘National Excellence Program - Development and operation of domestic personnel support system for students and researchers, implemented within the framework of a convergence program, supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund. The research was supported also by the Hungarian Scientific Research Fund OTKA T 109860 project and was partially carried out in the framework of the Centre of Excellence of Innovative Engineering Design and Technologies at the University of Miskolc.

Literatura / References

- [1] Bródka, J., Broniewicz, M. (2001), *Konstrukcje stalowe z rur*. Arkady, Warszawa.
- [2] Eurocode 3. EN 1993-1-1: (2009), *Design of steel structures. Part 1-1: General structural rules*. Brussels.
- [3] Farkas J., Jármay K., (2008), *Design and optimization of metal structures*. Horwood Publ., Chichester, UK.
- [4] Farkas J., Jármay K., (2013), *Optimum design of steel structures*. Heidelberg, etc. Springer, 2013.
- [5] Jármay K., Farkas J., (1999), *Cost calculation and optimization of welded steel structures*. J Constr Steel Res Vol.50, 115-135.
- [6] Static design procedure for welded hollow section joints (2012), Recommendations. ISO 14346, IIV-doc. XV-1402-12.