

Asekurowany segment energoaktywny hali przekryty strukturą zredukowaną ze ściągiem Secured energy-active segment of a steel hall, covered with reduced structure with a tie

Zbigniew Kowal¹, Rafał Piotrowski¹, Monika Siedlecka¹

¹Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych,
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska
Al. 1000-lecia PP 7, 25-323 Kielce

e-mail: zbigko@tu.kielce.pl, rafalp@tu.kielce.pl, monikach@tu.kielce.pl

¹Department of Structure Mechanics, Metal Structures and Computer Methods
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology
Al. 1000-lecia PP 7, 25-323 Kielce

e-mail: zbigko@tu.kielce.pl, rafalp@tu.kielce.pl, monikach@tu.kielce.pl

Streszczenie

W pracy pokazano koncepcję konstrukcji hal z energoaktywnymi segmentami dylatacyjnymi. Segmenty przekryto strukturą zredukowaną (ze ściągiem), o spadku połaci powyżej 20% umożliwiającym samooczyszczanie powierzchni pokrycia ze śniegu [5]. Długość energoaktywnych segmentów wyznaczono metodą optymalizacji probabilistycznej [3,6] zachowując nośność i niezawodność konstrukcji powyżej niezawodności klasy RC2 [1]. Koncepcja umożliwia redukcję wpływów termicznych na siły i przemieszczenia węzłów segmentu do konwencjonalnych wielkości normowych. W koncepcji uwzględniono, że absorbery termiczne będą zdylatowane względem konstrukcji nośnej.

Abstract

The paper presents a concept of steel halls with energy-active expansion segments. The segments were covered with a reduced structure (with a tie), which had slopes greater than 20% allowing snow self-clearance of the roof plane [5]. The lengths of energy-active segments were determined using the probabilistic optimisation method [3,6]. The structure capacity and reliability were maintained to be higher than those specified for RC2 class [1]. The concept makes it possible to reduce thermal impacts on the forces and displacements of the segment nodes to conventional values stated in the code. The concept accounts for distancing the thermal absorbers from the load bearing structure.

Słowa kluczowe: energoaktywne segmenty hal, struktury metalowe, przekrycia ze ściągiem, niezawodność konstrukcji
Keywords: energy-active segments of steel buildings, metal structures, covers with a tie, structure reliability

1. Wprowadzenie

W pracy rozwinięto koncepcję budowy energoaktywnych segmentów dylatacyjnych hal [4]. Segmenty przekryto strukturą zredukowaną ze ściągiem w celu zmniejszenia masy konstrukcji i zwiększenia nachylenia przekrycia $\geq 20\%$. Nachylenie ($\alpha > 10^\circ$) (rys. 1a) umożliwia samoczynne suwanie śniegu. Zastosowano ściągi ze stali walcowanej z uwagi na większy moduł sprężystości E aniżeli lin budowanych z drutów. Ponadto wytrzymałość liniowa lin jest około $f_{y,lin} / f_y = 5$ razy większa aniżeli stal walcowana co wywołałoby zwiększenie ekstremalnych przemieszczeń głowic słupów.

W koncepcji segmentów dylatacyjnych uwzględniono [4] swobodne wydłużenie Δ_T segmentu dylatacyjnego, spowodowane lokalnie awaryjną temperaturą 100°C . Zastosowano ostojowe stężenie słupów w środku długości segmentu dylatacyjnego. Przewidziano możliwość automatycznego włączenia transportu ogrzanego wewnątrz segmentu powietrza za pomocą wentylatorów ssąco-tłoczących przy temperaturze powietrza rzędu $+20^\circ\text{C}$. Liczbę i nośność ściągow najsłabszego KDMZ segmentu dylatacyjnego hali dostosowano do niezawodności klasy RC2 [1] o wskaźniku $t_2 = \beta = 3,8$. Konstrukcję przekrycia energoaktywnego segmentu złożono z geometrycznie niezmiennych segmentów

1. Introduction

In the paper, the concept of energy-active segments of steel halls was developed [4]. The segments were covered with a reduced structure with a tie to decrease the construction weight and to increase the slope of the cover $\geq 20\%$. The slope ($\alpha > 10^\circ$) (Fig. 1a) makes it easy for snow to slide down. Ties of rolled steel cross-section were used, because of a higher modulus of elasticity than that of steel line. In addition, linear strength of the lines is $f_{y,lin} / f_y = 5$ times higher than the strength of rolled steel, which would cause an increase in extreme movements of the heads of the columns.

In the concept, free extension Δ_T of the expansion segment due to local failure temperature of 100°C was accounted for [4]. Bracing of the columns at the mid-length of the expansion segment was employed. The concept included the option of automatic switching on of the warm air transport within the segment by means of suction/pressure fans when the air temperature is approx. $+20^\circ\text{C}$. The number and capacity of ties of the weakest kinematically admissible failure mechanism (KAFM) of the steel hall expansion segment were adjusted to the reliability of RC2 class [1] stated by the reliability index $t_2 = \beta = 3.8$. The covering of the energy-active segment is composed of geometric invariable assembly segments that have

*Udział w Projekcie pt. „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, realizowanego w ramach Priorytetu 1, Działanie 1.1, Poddziałanie 1.1.2, temat 7.4: KONSTRUKCYJNE ROZWIĄZANIA ENERGOAKTYWNYCH PRZEKRYĆ BUDOWLANYCH PRZYSTOSOWANYCH DO POZYSKIWANIA ENERGII CIEPLNEJ.

* participation in the Project *Innovative Means and Effective Methods of Improving Reliability and Service Life of Civil Engineering Structures and Transport Infrastructure in the Sustainable Development Strategy* carried out within the frames of Priority Axis 1, Action 1.1, Sub-measure 1.1.2, Subject 7.4: STRUCTURAL SOLUTIONS FOR ENERGY-ACTIVE BUILDING COVERS ADAPTED TO THERMAL ENERGY EXTRACTION.

montażowych optymalizujących czas i koszty montażu konstrukcji (rys. 1b).

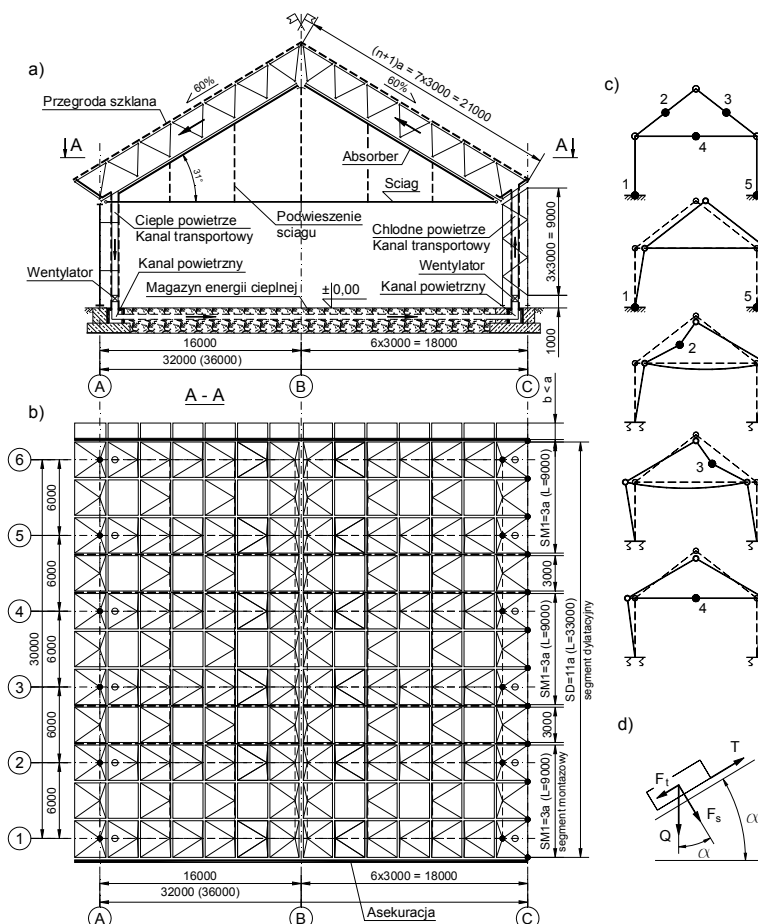
identical geometric structure, which optimises the time and costs of the assembly process (Fig. 1b).

2. Konstrukcja energoaktywnych segmentów hali

2. Construction of steel building energy-active segments

Na rys. 1b pokazano koncepcję podziału segmentu dylatacyjnego konstrukcji ($L_d = 33\text{m}$) na 3 segmenty montażowe o oczkach kwadratowych i module $a = 3\text{m}$, długości $L_m = 9\text{m}$. Każdy oparto na 2×6 słupach ścian podłużnych (rys. 1b) – co 6m w co drugim oczku pełnym.

Fig. 1b presents the idea of the structure expansion segment ($L_d = 33\text{m}$) division into three assemblies, $L_m = 9\text{m}$ in length, with square mesh $a = 3\text{m}$. Each assembly is supported on 2×6 columns of longitudinal walls (Fig. 1b), spaced 6m apart in every other full mesh.



Rys. 1. Segment dylatacyjny: a) przekrój, b) podział na segmenty montażowe, c) KDMZ segmentu dylatacyjnego, d) schemat zsuwania się śniegu.

Fig. 1. Expansion segment: a) cross-section, b) division into assemblies, c) KAFM of the expansion segment, d) diagram of snow sliding down.

Na rys. 1a pokazano koncepcję transportu ogrzanego powietrza do magazynów EC. Rury zlokalizowano przy słupach jedno gałęziowych lub wewnątrz słupów trójgałęziowych.

Fig. 1a shows the idea of warm air transport to the thermal energy (TE) storage facilities. Pipes were located at one-branch columns or inside three-branch columns.

W każdym dwuspadowym segmencie dylatacyjnym występuje sześć ściągnięć łączących skrajne węzły dolne struktury (rys. 1a).

In each double-sloped expansion segment, six ties connecting outmost lower nodes of the structure are found (Fig. 1a).

Zmniejszenie odstępu $b < a$ (rys. 1b) między segmentami asekuje symetryczne przemieszczenie głowic słupów w przypadku zniszczenia ściągnięć, stanowiących najmniejszy krytyczny zbiór prętów w segmencie energoaktywnym.

Decreasing the distance $b < a$ (Fig. 1b) between segments secures symmetrical displacements of column heads in the event of damage to the ties, which constitute the least critical set of rods in the energy-active segment.

3. Nośność i niezawodność segmentu dylatacyjnego

3. Capacity and reliability of the expansion segment

Na rys. 1c oznaczono najmniejsze globalne KDMZ super

Fig. 1c shows the least global KAFMs of super-elements

elementów występujących w energoaktywnych segmentach: 1) przechyłowe – słupów (1;5) na lewo lub na prawo; 2) wiązki 6 pasów dolnych segmentu przekrycia na lewej (2) lub na prawej (3) połaci; 3) wiązki ściągow (4).

Do analizy niezawodności wybrano najsłabszy KDMZ wiązki $n = 6$ ściągow. Każdy zwymiarowany wg normy [2] ściągi zbudowany jest szeregowo z 3 elementów walcowanych długości 12m i 4 połączeń, łącznie 7 elementów sprawczych klasy RC2. Każdy element o wskaźniku niezawodności $t_2 = \beta = 3,8$ ma niezawodność [8] $p_1 = 0,999\ 927\ 652$ oraz awaryjność $q_1 = 1 - p_1 = 0,000\ 072\ 348$.

Awaryjność q_s ściągu (3.1) oraz zmniejszona niezawodność p_s ściągu (3.2), wynoszą:

$$q_s = 1 - \prod p_i = n \cdot q_i = 7 \cdot 0.000\ 072\ 348 = 0.000\ 506\ 436 \quad (3.1)$$

$$p_s = 1 - q_s = 1 - 0.000\ 506\ 436 = 0.999\ 493\ 564 \quad (3.2)$$

gdzie: q_s – awaryjność ściągu; p_s – niezawodność ściągu; n – liczba elementów sprawczych w ściągu.

Wskaźnik niezawodności ściągu zmniejsza się (3.3) [8]:

$$t_s = 3.287 < t_2 = 3.8 \quad (3.3)$$

Zmniejszenie s nośności ściągu w stosunku do nośności elementów w przypadku współczynnika zmienności nośności elementów sprawczych $v_1 = 0,1$, wynosi (3.4) [3]:

$$s = (1 - t_2 v_1) / (1 - t_s v_1) = (1 - 3.8 v_1) / (1 - 3.287 v_1) = 0.9236 \quad (3.4)$$

Zwiększenie nośności [3] pojedynczego ściągu do klasy RC2 wymaga zmniejszenia awaryjności elementów (3.5):

$$q = q_i / n = 0.000\ 072\ 348 / 7 = 0.000\ 010\ 335 \quad (3.5)$$

Niezawodność elementów ściągu powinna wynosić (3.6):

$$p = 1 - q = 1 - 0.000\ 010\ 335 = 0.999\ 989\ 665 \quad (3.6)$$

Wskaźnik niezawodności elementów po zwiększeniu ich nośności do $E(N_s)$ powinien wynosić $t = 4,254$ [8].

Kwantyl nośności ściągu należy obliczyć ze wzoru (3.7):

$$N_{s,k} = E(N_1)[1 - 4.254 v_1] \quad (3.7)$$

gdzie: $E(N_1)$ – nośność oczekiwana pojedynczego ściągu.

Kwantyl nośności elementów obliczony z wzoru (3.7) spełni wymagania niezawodności ściągu o wskaźniku $t_2 = 3,8$. W przypadku $v_1 = 0,1$ obliczeniową nośność ściągu należy obliczać ze wzoru (3.8):

$$N_{1k} = E(N_1)[1 - 4.254 \times 0.1] = 0.5746 E(N_1) \quad (3.8)$$

Potrzeba zwiększenia nośności $E(N_1)$ elementów ściągu w celu dostrojenia obliczeniowej nośności odrębnych ściągow do niezawodności klasy RC2 [1] wynosi (3.9) [3]:

$$s_6 = N_{s,k} / N_{1k} = (1 - t_2 v_1) / (1 - t v_1) = (1 - 3.8 v_1) / (1 - 4.254 v_1) = 1.079 \quad (3.9)$$

Zwiększenie nośności wskutek sprzężenia „ n ” ściągow oszacujemy z (3.10) [6]:

$$s = [1 - t_s v_1 / n^{0.5}] / [1 - t_s v_1] \quad (3.10)$$

Z uwagi na konsekwencję zniszczenia ściągow, zastosowano asekurację redukując liczbę „ n ” z wzoru: $n_0 = n - 2 = 4$ oraz redukując v_1 do 0,06. Zwiększenie nośności sprzężonej wiązki ściągow wynosi (3.11):

$$s_4 = [1 - 3.8 \times 0.06 / 4^{0.5}] / [1 - 3.8 \times 0.06] = 0.886 / 0.772 = 1.1477 > 1.079 \quad (3.11)$$

Równoległe sprzężenie większej liczby $n \geq 4$ ściągow nie wymaga zwiększenia nośności elementów.

W konstrukcji przekrycia z co drugim oczkiem pustym, w rachubę wchodzi wykorzystanie asekuracji nośności i niezawodności wynikającej z niedociążenia skrajnych elementów segmentu. Taka asekuracja powstaje, w przypadku $b < a$, w wyniku pozostawienia struktury o niezredukowanych

that occur in energy-active segments: 1) tilt – of columns (1;5) to the left or to the right; 2) of the bundle of six bottom chords of the cover segment on the left (2) or right (3) roof plane; 3) of the bundle of ties (4).

For the reliability analysis, the weakest KAFM of the bundle $n = 6$ ties was selected. Each tie, dimensioned in accordance with the code [2], is constructed in series of three rolled members, 12 m in length, and of four joints, making seven RC2 class decisive elements altogether. Each element with the reliability index $t_2 = \beta = 3.8$ has the reliability [8] $p_1 = 0.999\ 927\ 652$ and failure rate $q_1 = 1 - p_1 = 0.000\ 072\ 348$.

The failure rate q_s of the tie (3.1) and the decreased reliability p_s of the tie (3.2) are:

where: q_s – the tie failure rate; p_s – the tie reliability; n – number of decisive elements in the tie.

The reliability index of the tie is decreased (3.3) [8]:

A decrease s in the tie capacity with respect to the capacity of elements for the coefficient of variation in the capacity of decisive elements $v_1 = 0.1$ amounts to (3.4) [3]:

To increase the capacity [3] of a single tie to that of RC2 class, it is necessary to decrease the failure rate of elements (3.5):

The reliability of the tie elements should be (3.6):

The reliability index of the elements, after their capacity was increased to $E(N_s)$, should amount to $t = 4.254$ [8].

The tie capacity quantile, computed from formula (3.7):

where: $E(N_1)$ – expected capacity of a single tie.

The quantile of the capacity of elements, computed from formula (3.7), will satisfy the requirements on the reliability of the tie with index $t_2=3.8$. When $v_1 = 0.1$, the computational capacity of the tie should be calculated from formula (3.8):

Increase in the capacity $E(N_1)$ of the tie elements, necessary to adjust the computational capacity of individual ties to RC2 class reliability [1], amounts to (3.9) [3]:

Increase in the capacity of “ n ” coupled ties is estimated from (3.10) [6]:

Because of potential consequences of tie failure, preventive measures were taken, namely number “ n ” from formula: $n_0 = n - 2 = 4$ was diminished and v_1 was reduced to 0.06. Increase in the capacity of the coupled bundle of ties amounts to (3.11):

Parallel coupling of a greater number $n \geq 4$ of ties does not make it necessary to increase the capacity of elements.

In the cover, where every other mesh is empty, it is possible to ensure capacity and reliability by relying on underloading of the edge elements of the segment. When $b < a$, such a protection will be provided by means of leaving unreduced sections of the structure in the edge strand of the expansion segments. In Fig.

przekrojach w skrajnych pasmach segmentów dylatacyjnych. Asekurację oznaczono grubą linią na rys. 1b.

4. Samoczyszczący segment energoaktywny

Fizyczny proces samooczyszczania się połaci dachowej ze śniegu jest opisany zależnościami (4.1) [5]:

$$F_t > T = \mu F_s ;$$

gdzie: $F_t = Q \cdot \sin \alpha$, $F_s = Q \cdot \cos \alpha$ – składowe obciążenia śniegiem; T – siła tarcia; $F_{t,s}$ – siła spoiwości; μ – współczynnik tarcia (rys. 1d).

Efektywne samooczyszczanie powierzchni pokrycia (w tym szkła samoczyszczającego) występuje, gdy spadek dachu wynosi $\alpha > 10^0$ ($\text{tg} \alpha > 0,2$) [5].

Na współczynnik tarcia w przekryciu konstrukcji energoaktywnej wpływa rodzaj pokrycia. W przypadku gładkiej przegrody szklanej, współczynnik tarcia śniegu o pokrycie, wynosi około 0,17.

Współczynnik tarcia należy wyznaczyć doświadczalnie. Efekt samooczyszczania można zwiększyć ogrzewając pokrycie od spodu ciepłym powietrzem, np. zmagazynowanym w podłożu (rys. 1a).

5. Podsumowanie, uwagi, wnioski

Zastosowanie sztywnych ściągów: 1) ułatwia kształtowanie samoczyszczających spadków przekryć segmentów energoaktywnych sprzyjających pozyskiwaniu EC i EE w okresach deficytu energii; 2) redukuje przemieszczenia głowic słupów hal; 3) pozwala na wykorzystanie sztywnych ściągów łączących głowice słupów do budowy sufitów podwieszonych; 4) sprzyja redukcji wyężenia i masy konstrukcji.

Asekurowane sprzężenie elementów sprawczych o liczebności MKZE $n \geq 4$ pozwala na dostrajanie nośności i niezawodności hal do zalecanych klas niezawodności RC2 lub RC3 [1] bez zwiększenia nośności elementów wymiarowanych na podstawie norm.

W przyjętej koncepcji konstrukcji można redukować wpływ temperatury stosując przekładki neoprenowe w głowicach słupów [7].

Literatura • References

- [1] PN-EN 1990:2004, Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PN-EN 1993-1-1:2006, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [3] Kowal Z., (2013), *On Adjusting the Load Bearing Capacity of Decisive Members to Reliability Classes of Statically Determinate Complex Structures*, Archives of Civil Engineering, LIX, 1, 2013, pp.132-142.
- [4] Kowal Z., Piotrowski R., (2013), *Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal z przekryciem strukturalnym*, BiA PL, Vol. 12(2), 2013, s. 221-228.
- [5] Kowal Z., Siedlecka M., (2013), *Energoaktywne segmenty samoczyszczającego przekrycia hali*, EAB, XXI OIKNT, Bielsko-Biała 10-12.10.2013, s. 161-168.
- [6] Kowal Z., (2014), *Instruments of probabilistic optimisation of load bearing capacity and reliability of statically indeterminate complex structures*, accepted for print publication in Archives of Civil Engineering, No. 1, 2014.
- [7] Kowal Z., Brzezińska K., *Wpływ temperatury na kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia energoaktywnych segmentów hali*, Praca przyjęta na konferencję ZK2014 – Suchedniów 2014.
- [8] Tablice statystyczne rozkładu normalnego.

1b, that is indicated with a thick solid line.

4. Self-clearing energy-active segment

The physical process of the roof plane self-clearing of snow is described by the dependences (4.1) [5]:

$$F_t > F_{t,s} \quad (4.1)$$

where: $F_t = Q \cdot \sin \alpha$, $F_s = Q \cdot \cos \alpha$ – components of snow load; T – friction force; $F_{t,s}$ – cohesion force; μ – friction coefficient (Fig. 1d).

Effective self-clearance of the cover surface (including the pane) occurs when the roof slope is $\alpha > 10^0$ ($\text{tg} \alpha > 0.2$) [5].

The friction coefficient in the energy-active structure cover is affected by the type of covering. For a smooth glass barrier, the coefficient of snow friction against the covering is approx. 0.17.

The friction coefficient needs to be determined experimentally. The self-clearing capability of the covering can be enhanced by heating the cover from inside with warm air, which can be stored in the ground (Fig. 1a).

5. Summary, remarks, conclusions

The use of rigid ties: 1) facilitates the formation of self-clearing sloped covers of energy-active segments, conducive to obtaining EC and EE during periods of energy deficit; 2) reduces the movement of the heads of hall columns; 3) allows the use of rigid tie connecting the heads of columns to construct suspended ceilings; 4) contributes to the reduction in the structure strain and mass.

Preventive coupling of decisive elements, the minimal critical set size of which is $n \geq 4$, makes it possible to adjust the capacity and reliability of steel buildings to recommended RC2 or RC3 reliability classes [1]. It is achieved without increasing the capacity of elements dimensioned in accordance with the code.

The structure concept presented in the paper allows reducing the impact of temperature by using neoprene spacers in column heads [7].