

Wpływ podatności obrotowej połączenia rygiel - słup na sztywność połączeniową energoaktywnego przekrycia hali ramowo-płatwiowej

Karolina Brzezińska, Andrzej Szychowski¹

¹ *Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: k.brzezinska@tu.kielce.pl, aszychow@tu.kielce.pl*

Streszczenie: W pracy przeanalizowano wpływ podatności obrotowej połączenia rygiel-słup na sztywność połączeniową podłużnie stężonego przekrycia ramowo - płatwiowego hali o konstrukcji pełnościennej, przystosowanej do pozyskiwania energii cieplnej z promieniowania słonecznego. W takim przypadku pokrycie dachu stanowi szklana przegroda przezroczysta, wymagająca znacznej sztywności połączeniowej przekrycia. Celem analizy było porównanie sztywności połączeniowej przekrycia ramowo-płatwiowego z przekryciami strukturalnymi i wiązarowo-płatwiowymi, w zależności od typu stężenia podłużnego oraz sztywności obrotowej połączenia rygiel-słup. Badania przeprowadzono dla trzech schematów stężeń połączeniowych i różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ –połączenie przegubowe, przez $u=0,25$; $0,5$; $0,75$ –połączenie podatne, do $u=1$ –połączenie sztywne). W przenoszeniu sił poziomych zaobserwowano zjawisko interakcji sztywności ram z węzłami podatnymi (rygiel-słup) z połączeniowymi stężeniami podłużnymi, opartymi na stężeniach poprzecznych ścian szczytowych. Największą sztywność połączeniową wykazały stężenia „2X” i „K” ze sztywnymi węzłami w narożach ram.

Słowa kluczowe: sztywność połączeniowa, połączenia podatne, systemy stężeń, przekrycia energoaktywne.

1. Wprowadzenie

Współczesne konstrukcje hal (przemysłowych, magazynowych itp.) można przystosować do czynnego pozyskiwania energii cieplnej z promieniowania słonecznego [1,2]. Cechą charakterystyczną konstrukcji energoaktywnych jest to, że w płaszczyźnie pasów górnych elementów konstrukcyjnych przekrycia (struktur przestrzennych, płatwi, wiązarów dachowych lub dźwigarów pełnościennych) umieszcza się przegrodę przezroczystą (najlepiej szklaną dla wywołania „efektu szklarniowego”), wrażliwą na odkształcalność przekrycia w jego płaszczyźnie. W przypadku hal pełnościennych, zbudowanych z płaskich ram połączonych płatwiami i ryglami ściennymi, może występować swoiste „klawiszowanie” poszczególnych ram nośnych. Przyczyną tego jest m.in. nierównomierne obciążenie wiatrem na długości hali. Wg normy [3] obciążenie wiatrem szczytowych segmentów hal jest większe od obciążeń w części środkowej. Występuje także możliwość uwzględnienia zmiennej na długości hali intensywności obciążenia ścian bocznych, zwłaszcza dla hal długich. Taka sytuacja może doprowadzić do pęknięcia szyb pokrycia, podobnie jak w przypadku hal wiązarowo-płatwiowych [4].

W pracy [5] zbadano sztywność połączeniową przekryć strukturalnych (zredukowanych i regularnych) o oczkach kwadratowych. W celu wyznaczenia umownej sztywności połączeniowej samego przekrycia (bez udziału sztywności giętej słupów) zaproponowano procedurę numerycznego szacowania w/w sztywności dla przekrycia podpartego jedynie na słupach wahaczowych oraz na poprzecznych „niepodatnych” stężeniach ścian szczytowych hali. Z kolei w pracy [4] zbadano sztywność połączeniową przekrycia wiązarowo-płatwiowego zaopatrzonego w różne systemy stężeń podłużnych i poprzecznych. W celu oszacowania sztywności połączeniowej samego przekrycia, konstrukcję ram kratowych oparto na słupach wahaczowych i podparto (na obciążenia poziome) na „niepodatnych” stężeniach ścian

szczytowych. Wykazano, że w celu redukcji „klawiszowania” pojedynczych płaskich ustrojów poprzecznych hali (wywołującego nadmierne odkształcenia przegrody szklanej) konieczne jest wprowadzenie okapowych stężeń podłużnych.

W pracy [6] pokazano probabilistyczną optymalizację nośności i niezawodności stalowych słupów hal tradycyjnych. Wykazano, że w celu zwiększenia niezawodności słupów hal należy sprzęgać ich głowice za pomocą podłużnych stężeń połączeniowych w jeden kinematycznie dopuszczalny mechanizm zniszczenia.

W przypadku hal o konstrukcji ramowo-płatwiowej dodatkowym elementem, wpływającym na sztywność połączeniową, jest sztywność obrotowa węzła rygiel-słup. W normie [7] węzły takie podzielono na trzy grupy: a) węzły sztywne, b) węzły podatne oraz c) węzły nominalnie przegubowe. Węzeł można klasyfikować porównując jego sztywność początkową z wartościami granicznymi, jako: 1) sztywny (WS), gdy ma wystarczająco dużą sztywność obrotową, aby uzasadnione było w analizie założenie o pełnym przeniesieniu momentów zginających przez węzeł, 2) nominalnie przegubowy (WNP), gdy jest zdolny do przeniesienia sił wewnętrznych bez udziału znaczących momentów, które mogłyby niekorzystnie oddziaływać na elementy lub konstrukcję jako całość, 3) podatny (WP), gdy nie spełnia kryteriów węzła sztywnego lub węzła nominalnie przegubowego [7].

Wskaźnik sztywności połączenia rygiel-słup zmieniający się od 0 (połączenie przegubowe) do 1 (połączenie w pełni sztywne) można wyznaczyć z zależności (1) wg [8].

$$u = \frac{1}{1 + 3EK / S} \quad (1)$$

gdzie: $K=I/L$ – moment bezwładności rygla podzielony przez jego długość, S - sieczna sztywność połączenia.

W klasycznych konstrukcjach ramowych hal z węzłami podatnymi połączenia rygiel-słup istotnym elementem konstrukcyjnym są poprzeczne stężenia połączeniowe oraz pionowe stężenia podłużne. Do zadań tych stężeń należy przenoszenie sił od parcia (ssania) wiatru na ściany szczytowe oraz redukcja długości zwichrzeniowej zginanych dźwigarów pełnościennych. Z kolei stężenia połączeniowe podłużne są tradycyjnie stosowane jedynie wówczas, gdy występują pośrednie słupy obudowy hali lub istnieją znaczne miejscowe obciążenia działające prostopadle do ściany podłużnej [9]. W tradycyjnych układach ramowych, blacha fałdowa będąca przekryciem połaci dachowej jednocześnie istotnie zwiększa sztywność połączeniową przekrycia.

W przypadku konstrukcji energoaktywnych, nastawionych na pozyskiwanie energii cieplnej z promieniowania słonecznego, na płatwiach zamiast blach fałdowych umieszcza się szklaną przegrodę, wymagającą znacznej sztywności połączeniowej w celu zabezpieczenia przed pękaniem szyb.

W niniejszej pracy porównano sztywność połączeniową przekrycia hali pełnościennej z przekryciem strukturalnym [5] oraz dachem wiązarowo-płatwiowym [4] o analogicznych wymiarach gabarytowych. Dodatkowo uwzględniono wpływ sztywności obrotowej połączenia rygiel-słup na sztywność połączeniową podłużnie stężonego przekrycia ramowo-płatwiowego, przystosowanego do pozyskiwania energii cieplnej z promieniowania słonecznego.

2. Schemat statyczny hali ramowo-płatwiowej

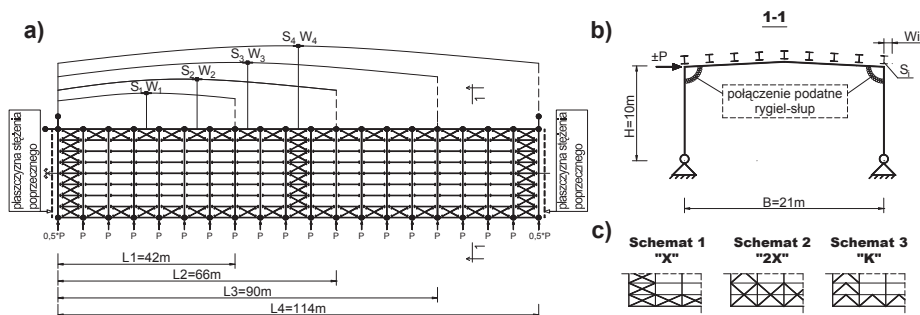
Do oszacowania umownej sztywności połączeniowej prototypowego przekrycia ramowo-płatwiowego przyjęto dwuspadową halę stalową o konstrukcji pełnościennej, zbudowaną z powtarzalnego układu płaskich ram portalowych o rozpiętości $B=21\text{m}$ i rozstawie co 6m (rys. 1, uwaga: rozpiętość i rozstaw ram odpowiada konstrukcjom analizowanym w pracach [4,5]). Elementy nośne konstrukcji zostały obliczone na siły przekrojowe, wynikające z obciążeń stałych przekrycia energoaktywnego oraz obciążeń zmiennych klimatycznych odpowiadających I strefie obciążenia wiatrem [3] i III strefie obciążenia śniegiem [10]. W celu oszacowania wpływu sztywności połączenia rygiel-słup na sztywność połączeniową przekrycia przyjęto przegubowe połączenie słupów z fundamentem. Przyjęto trzy schematy wykonania podłużnych stężeń połączeniowych. Stężenia te oparto (na siły poziome) w „niepodatnych” stężeniach ścian szczytowych. Taki

schemat statyczny pozwala na oszacowanie sztywności połączeniowej samego przekrycia (dla $u=0$) oraz z uwzględnieniem wskaźnika sztywności połączenia rygiel-słup ($0 < u < 1$), ale bez wpływu sztywności giętej połączenia słup-fundament.

2.1. Model obliczeniowy

Badania numeryczne (MES) przeprowadzono, przy użyciu programu Autodesk Robot Structural Analysis 2009, na modelach obliczeniowych wcześniej zwymiarowanej konstrukcji o rozpiętości $B=21\text{m}$ i wysokości $H=10\text{m}$. W układzie konstrukcyjnym zastosowano następujące przekroje: 1) rygle – HEB360, 2) słupy – HEB340, 3) płatwie - HEA160. Połączenie rygiel-słup rozpatrywano w pięciu wariantach sprężystego zamocowania (od $u=0$ - zamocowanie przegubowe, poprzez $u=0,25$; $0,5$, $0,75$ – węzeł podatny, do $u=1$ – węzeł w pełni sztywny). W przypadku przegubowego połączenia rygiel-słup ($u=0$) stateczność układu w przestrzeni zapewniają stężenia połączeniowe podłużne oparte na „niepodatnych” stężeniach poprzecznych ścian szczytowych. Wariant ten przeanalizowano w celach porównawczych z wynikami zamieszczonymi w pracy [4] (dla wahaczowego schematu słupów). W każdym przypadku blokowano całkowicie obrót względem osi podłużnej elementu, nadając na kierunku R_x współczynnik sztywności równy $1,0$. Względem pozostałych osi przekroju rygla (y,z) nadawano odpowiednią wartość częściowej sztywności połączenia $u=0$; $0,25$; $0,5$; $0,75$; 1 . Połączenie płatwi z ryglami oraz stężeń z elementami nośnymi konstrukcji definiowano jako nominalnie przegubowe.

Na rys. 1 pokazano schemat rozwijania długości przekrycia ramowo-płatwiowego $L_i=42, 66, 90, 114\text{m}$, przy czym długości te również odpowiadają konstrukcjom energoaktywnym analizowanym w pracach [4,5]. Do węzłów górnych ramy przyłożono porównawcze obciążenie poziome $P=20/10\text{kN}$ (dla ramy środkowej/skrajnej), które w przybliżeniu odpowiada I strefie obciążenia parciem i ssaniem wiatru hali o wysokości $\sim 10\text{m}$.



Rys. 1. Schemat konstrukcji ramowo-płatwiowej : a) rozmieszczenie „punktów pomiarowych” (W_i, S_i), b) przekrój poprzeczny, c) schematy stężeń.

2.2. Schematy stężeń

Zastosowano trzy schematy stężeń połączeniowych podłużnych, dla których szacowano przemieszczenia (W_i) oraz dodatkowe siły (S_i) w skrajnych płatwiach przekrycia (rys.1a) w zależności od wskaźnika (u) sztywności połączenia rygiel-słup. Stężenia podłużne rozmieszczono w polach przyokapowych, natomiast poprzeczne w polach skrajnych i nie rzadziej niż co ósme pole. Stężenia poprzeczne w środku długości hali zastosowano dla $L_i=90, 114\text{m}$. W celu optymalizacji konstrukcji hal o znacznej długości przekroje stężeń podzielono na strefy w zależności od wyteżenia przekroju. Jako stężenia połączeniowe zastosowano następujące schematy (rys.1c): 1) stężenia ciągnowe z prętów okrągłych max $\Phi 30$ wysokości jednego pola (stężenie „X”); 2) stężenie ciągnowe max $\Phi 30$ przez dwa pola (stężenie „2X”); 3) stężenie prętowe na „K” z kątowników równoramienne o przekrojach: LR120x12, 100x12, 80x10 (w zależności od położenia pręta w stężeniu), przenoszące siły ściskające i rozciągające (stężenie „K”).

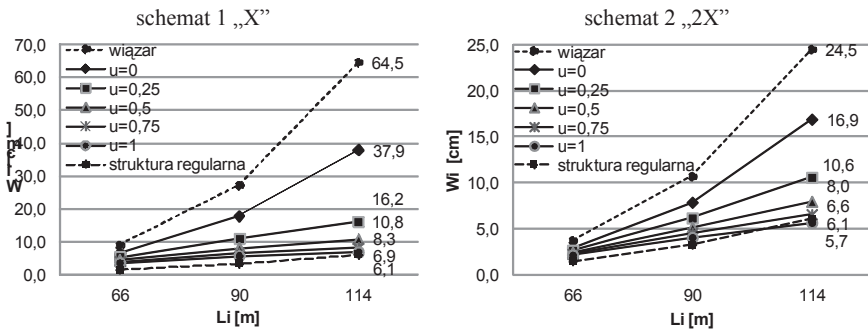
2.3. Wyniki obliczeń

W tabeli 1 zestawiono przemieszczenia poziome (W_i) oraz ekstremalne siły (S_i) w płatwiach skrajnych dla trzech schematów stężeń („X”, „2X”, „K”) w funkcji długości hali L_i . Ponadto każdy schemat rozpatrzono w pięciu wariantach sprężystego zamocowania rygiel-słup (od $u=0$ przez $u=0,25$; $0,5$; $0,75$ do $u=1$).

Tabela 1. Przemieszczenia poziome oraz ekstremalne siły w płatwiach skrajnych, w funkcji długości hali L_i , dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup.

	L_i [m]	$u=0$		$u=0,25$		$u=0,5$		$u=0,75$		$u=1$	
		W_i [cm]	$S_i(-)$ [kN]	W_i [cm]	$S_i(-)$ [kN]	W_i [cm]	$S_i(-)$ [kN]	W_i [cm]	$S_i(-)$ [kN]	W_i [cm]	$S_i(-)$ [kN]
schemat 1 „X”	42	1,6	67,2	1,5	63,2	1,4	60,3	1,4	57,9	1,3	56,1
	66	6,6	172,0	5,4	138,7	4,6	118,7	4,1	105,5	3,7	96,1
	90	17,9	305,7	11,0	185,5	8,2	137,6	6,7	111,7	5,8	95,6
	114	37,9	460,4	16,2	190,6	10,8	123,3	8,3	92,8	6,9	75,3
schemat 2 „2X”	42	0,8	48,8	0,8	47,0	0,8	45,7	0,7	44,6	0,7	43,8
	66	3,0	122,5	2,7	110,3	2,5	101,7	2,3	95,3	2,2	90,3
	90	7,9	222,1	6,2	173,2	5,2	145,4	4,6	127,5	4,1	115,0
	114	16,9	342,9	10,6	213,2	8,0	159,6	6,6	130,4	5,7	112,1
schemat 3 „K”	42	0,6	55,7	0,6	54,0	0,6	52,7	0,5	51,8	0,5	51,0
	66	3,1	137,1	2,8	123,2	2,5	113,4	2,4	106,1	2,3	100,5
	90	8,7	236,9	6,7	181,0	5,6	150,2	4,9	130,6	4,4	117,1
	114	19,8	359,2	11,8	210,2	8,7	153,3	7,1	123,4	6,1	105,0

Na rys. 2 porównano przemieszczenia poziome W_i przekrycia ramowo-płatwiowego, w funkcji długości hali ($L_i=66, 90, 114$ m), dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ do $u=1$). Liniami przerywanymi pokazano wyniki wg [4,5].

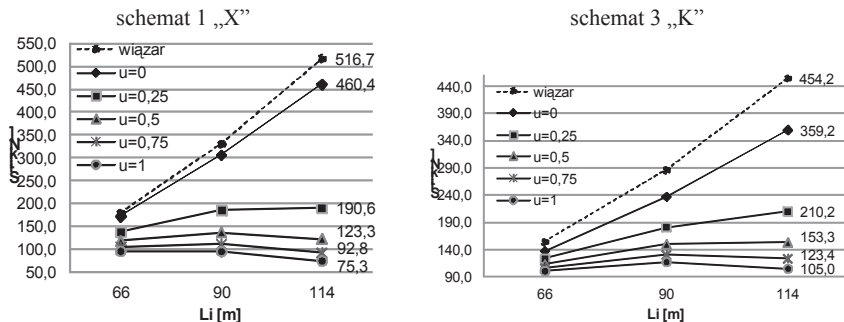


Rys. 2. Przemieszczenia w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup, dla: a) schematu 1 „X”; b) schematu 2 „2X”.

Największe wartości przemieszczeń uzyskano dla przegubowego połączenia rygiel-słup ($u=0$ – słupy wahaczowe) i są one nawet pięciokrotnie większe od przemieszczeń ramy z górnymi węzłami w pełni sztywnymi ($u=1$). Natomiast w stosunku do wyników pracy [4] uzyskano sztywność większą nawet o 40%. Ponadto przemieszczenia poziome konstrukcji pełnościennej dla $u=0$ (podobnie jak w [4]) rosną nieliniowo wraz z długością przekrycia ryglowo-płatwiowego L_i . Przyrost ten istotnie się zmniejsza wraz ze wzrostem wskaźnika sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0,25$ do $u=1$). Już dla $u \geq 0,5$ wykres przemieszczeń tylko nieznacznie odchyła się od linii prostej, sygnalizując rosnący wpływ sztywności połączenia rygiel-słup. Nie odnotowano istotnej różnicy w zachowaniu się konstrukcji pomiędzy układem stężeń wg schematu 2 i 3 -maksymalna różnica wyników wynosi tu 17% (tab.1). Najmniejszą sztywność połączeniową wykazał schemat 1 dla $u=0$ (maksymalne różnice w stosunku do schematu 3 dla $u=0$ wyniosły około 91%). Natomiast

od $u \geq 0,5$ różnice przemieszczeń są nieznaczne (rys.1, tab.1) niezależnie od schematu stężenia.

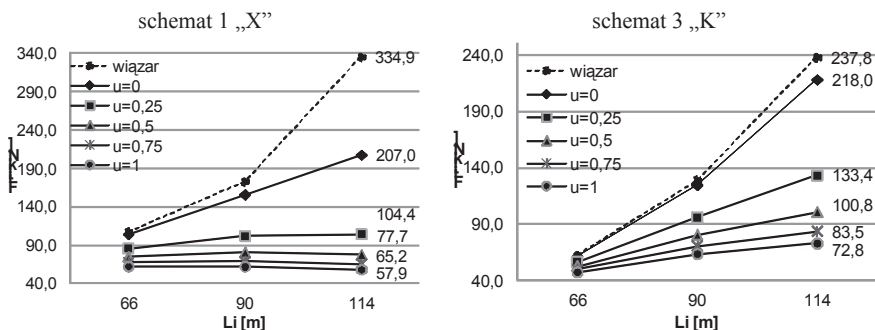
Na rys. 3 przedstawiono siły rozciągające S_i [kN] w płatwiach skrajnych w środku długości hali (por. rys.1a) dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ do $u=1$). Liniami przerywanymi zaznaczono odpowiednie wyniki wg [4].



Rys. 3. Siły rozciągające w płatwiach skrajnych w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup, dla: a) schematu 1 „X”; b) schematu 3 „K”.

Największe siły osiowe w płatwiach skrajnych wystąpiły dla przegubowego połączenia rygiel-słup ($u=0$). Jednocześnie są one mniejsze o około 10% dla schematu 1 „X” i około 21% mniejsze dla schematu 3 „K” niż w przypadku hal wiązarowo-płatwiowych [4]. W pozostałych przypadkach wraz ze wzrostem sztywności połączenia oraz wzrostem długości hali L_i występuje redukcja sił w płatwiach. Ten nieobserwowany w pracach [4,5] efekt „ośrodka sprężystego” ujawnił się najmocniej w schemacie 1 „X”. Na przykład dla hali długości 114m spadek wartości sił od $u=0$ do $u=1$ jest ponad sześciokrotny (dla stężenia „2X” i „K” – ponad trzykrotny).

Na rys. 4 zamieszczono wyniki ekstremalnych sił rozciągających w elementach stężeń F_i [kN], w funkcji długości hali, przy różnych wskaźnikach sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ do $u=1$), dla: a) schematu 1 „X”; b) schematu 3 „K”. Liniami przerywanymi zaznaczono odpowiednie wyniki wg [4].



Rys. 4. Ekstremalne siły rozciągające w elementach stężeń w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup, dla: a) schematu 1 „X”; b) schematu 3 „K”.

Największe siły w elementach stężeń uzyskano dla przegubowego ($u=0$) połączenia rygiel-słup. Są one jednak o około 40% dla schematu 1 „X” i około 10% dla schematu 3 „K” mniejsze od odpowiednich sił uzyskanych w pracy [4]. Wraz ze wzrostem wskaźnika sprężystego połączenia rygiel-słup ($u > 0$), siły w elementach stężeń ulegają redukcji. Największy spadek zanotowano dla schematu 1 „X” pomiędzy $u=0$ a $u=0,25$, zwłaszcza dla długich hal ($L_i \geq 90$ m).

3. Oszacowanie sztywności połączeniowej

Umowną sztywność połączeniową K_i przekrycia oszacowano ze wzoru (2) wg [5]:

$$K_i = \frac{qL_i}{W_i} = \frac{\sum P}{W_i} \quad (2)$$

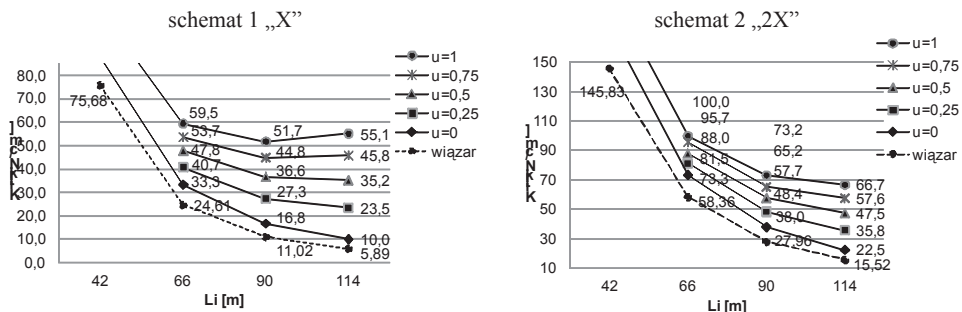
gdzie: $qL_i = \sum P$ - sumaryczne obciążenie poziome działające na konstrukcję o długości L_i ,
 W_i - maksymalne poziome przemieszczenie konstrukcji (por. rys. 1ab).

W tabeli 2 zamieszczono sztywności połączeniowe przekrycia ramowo-płatwiowego (kol. 4, 6, 8, 10, 12) w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ przez $u=0,25$; $0,5$; $0,75$ do $u=1$) i trzech rozpatrywanych schematów stężeń (por. rys. 1c).

Tabela 2. Umowna sztywność połączeniowa przekrycia hali o długości $L_i=42, 66, 90, 114$ m.

	L_i [m]	$\sum P$ [kN]	$u=0$		$u=0,25$		$u=0,5$		$u=0,75$		$u=1$	
			W_i	K_i	W_i	K_i	W_i	K_i	W_i	K_i	W_i	K_i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
schemat 1 "X"	42	140	1,6	87,5	1,5	93,3	1,4	100,0	1,4	100,0	1,3	107,7
	66	220	6,6	33,3	5,4	40,7	4,6	47,8	4,1	53,7	3,7	59,5
	90	300	17,9	16,8	11,0	27,3	8,2	36,6	6,7	44,8	5,8	51,7
	114	380	37,9	10,0	16,2	23,5	10,8	35,2	8,3	45,8	6,9	55,1
schemat 2 "2X"	42	140	0,8	175,0	0,8	175,0	0,8	175,0	0,7	200,0	0,7	200,0
	66	220	3,0	73,3	2,7	81,5	2,5	88,0	2,3	95,7	2,2	100,0
	90	300	7,9	38,0	6,2	48,4	5,2	57,7	4,6	65,2	4,1	73,2
	114	380	16,9	22,5	10,6	35,8	8,0	47,5	6,6	57,6	5,7	66,7
schemat 3 "K"	42	140	0,6	233,3	0,6	233,3	0,6	233,3	0,5	280,0	0,5	280,0
	66	220	3,1	71,0	2,8	78,6	2,5	88,0	2,4	91,7	2,3	95,7
	90	300	8,7	34,5	6,7	44,8	5,6	53,6	4,9	61,2	4,4	68,2
	114	380	19,8	19,2	11,8	32,2	8,7	43,7	7,1	53,5	6,1	62,3

Na rys. 5 porównano umowną sztywność połączeniową (K_i) w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup (od $u=0$ do $u=1$) ze sztywnością połączeniową dachu wiązarowo-płatwiowego [4] (linia przerywana).

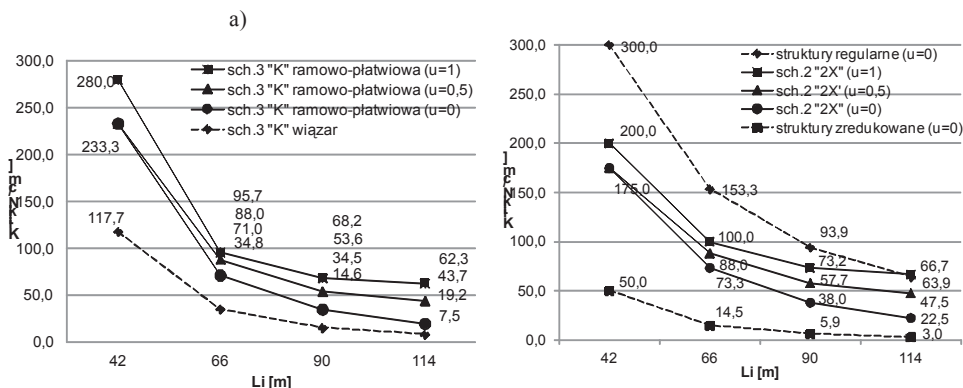


Rys. 5. Umowna sztywność połączeniowa w funkcji długości hali L_i dla różnych wskaźników sztywności połączenia rygiel-słup, dla: a) schematu 1 „X”; b) schematu 2 „2X”.

Umowna sztywność połączeniowa pełnościennej konstrukcji ramowo-płatwiowej maleje nieliniowo wraz ze wzrostem rozstawu pionowych stężeń poprzecznych hali. Dla hal o długości powyżej 90m spadek ten jest istotnie wyhamowany, a nawet dla schematu 1 „X” przy wskaźniku $u>0,75$ odnotowano łagodny wzrost sztywności połączeniowej. Wynika to z efektu „środkła sprężystego”, którego źródłem są sprężyste połączenia rygiel-słup. Efekt ten nie był obserwowany w pracach [4,5]. Schemat 1 „X” wykazał najmniejszą sztywność połączeniową dla każdej z badanych długości konstrukcji. Maksymalna różnica sztywności

połaciowej dla schematu 1 „X” i schematu 2 „2X” wynosi nawet 125% (dla $L_i=114\text{m}$ oraz $u=0$). Największe wartości sztywności połaciowej, niezależnie od długości konstrukcji, występują w przypadku sztywnego połączenia słup-rygiel.

Na rys. 6a porównano sztywność połaciową konstrukcji ramowo-płatwiowej ($u=0$; 0,5; 1) ze sztywnością analogicznej konstrukcji wiązarowo-płatwiowej [4]. Z kolei na rys. 6b porównano sztywność połaciową konstrukcji ramowo-płatwiowej ($u=0$; 0,5; 1) ze sztywnością struktur regularnych i zredukowanych [5].



Rys. 6. Porównanie sztywności połaciowej konstrukcji ramowo-płatwiowej z a) wiązarowo-płatwiową, b) ze strukturą regularną i zredukowaną.

Z porównania wykresów na rysunku 6a wynika, że konstrukcja ramowo-płatwiowa (dla $u=0$ i stężenia według schematu 3 „K”) charakteryzuje się większą sztywnością połaciową niż analogiczne przekrycie wiązarowo-płatwiowe. Podobną tendencję wykazały również pozostałe schematy stężeń („X” i „2X”). Przy zwiększeniu stopnia sprężystego połączenia rygiel-słup (od $u=0,5$ do $u=1$) umowna sztywność połaciowa konstrukcji ramowo-płatwiowej zmierza (dla dłuższych hal) do sztywności struktury regularnej (rys. 6b). Pozwala to na zastosowanie tej klasy hal z węzłami podatnymi do przekształcenia w konstrukcje energoaktywne przystosowane do absorbowania energii cieplnej z promieniowania słonecznego.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że zachodzi wpływ sztywności obrotowej połączenia rygiel-słup na sztywność połaciową podłużnie stężonego przekrycia ramowo-płatwiowego. Wpływ ten rośnie wraz z długością hali. We wszystkich badanych wielkościach (przemieszczenia, siły) zaobserwowano korzystny wpływ zwiększania wskaźnika sprężystego połączenia rygiel-słup. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku konstrukcji energoaktywnych, gdzie na płatach zamiast blach fałdowych umieszcza się szklaną przegrodę, wymagającą znacznej sztywności połaciowej. Duża sztywność przekrycia zabezpiecza konstrukcje energoaktywne przed pękaniem szyb [4,5].

Z punktu widzenia maksymalnej sztywności połaciowej oraz w celu wyrównania poziomego obciążenia poszczególnych słupów hal o pełnościennej konstrukcji ramowej, najbardziej korzystne jest zastosowanie stężeń połaciowych poprzecznych i podłużnych typu „2X” lub typu „K”. Zastosowanie jednocześnie okapowych stężeń podłużnych oraz połączeń rygiel-słup o wskaźniku utwierdzenia $u \geq 0,75$ pozwala na osiągnięcie wysokiej sztywności połaciowej (porównywalnej ze strukturami regularnymi) zwłaszcza dla hal długich.

Wraz z długością hali maleje wpływ okapowych stężeń podłużnych oraz rośnie wpływ sztywności połączenia rygiel-słup. W tym przypadku zadaniem stężeń podłużnych jest zapobieganie przed „klawiszowaniem” poprzecznych układów nośnych i zwiększanie niezawodności „przestrzennego” mechanizmu zniszczenia hali [6].

W przypadku przegubowego połączenia rygiel-słup uzyskano większą sztywność połaciową niż dla analogicznej konstrukcji wiązarowo-płatwiowej [4].

Literatura

- 1 Kowal Z., Szychowski A. Budowlana struktura przestrzenna do pozyskiwania energii cieplnej. Opis patentowy nr 166877. UP RP Warszawa 1995.
- 2 Kowal Z., Szychowski A. Budowlany dach wiązarowo-płatwiowy do pozyskiwania energii cieplnej. Opis patentowy nr 182933. UP RP Warszawa 2002.
- 3 PN-EN 1991-1-4:2008. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
- 4 Kowal Z., Otwinowska K., Szychowski A. Sztywność połączeniowa hal wiązarowo-płatwiowych przystosowanych do pozyskiwania energii z promieniowania słonecznego. ZNPR nr 283, Z59 (3/2012/II) 193- 200.
- 5 Kowal Z., Piotrowski R., Szychowski A. Sztywność połączeniowa struktur prętowych o oczkach kwadratowych, ZNPR nr 276, Z58 (3/2011/II) 249- 256.
- 6 Kowal Z. Probabilistyczna optymalizacja nośności słupów konstrukcji hal konwencjonalnych, ZNPR nr 283, Z59 (3/2012/II) 185- 192.
- 7 PN-EN 1993-1-8:2005 + AC:2005. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: projektowanie węzłów.
- 8 Bijak R., Szychowski A. Długości wybojczy słupów ram w świetle norm. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB. Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, 141-148.
- 9 Biegus A. Stalowe budynki halowe. Arkady, Warszawa 2006.
- 10 PN-EN 1991-1-3:2005. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.

The influence of rotational flexibility of beam-column connection on roof plane rigidity of energy-active cover of frame-purlin hall

Karolina Brzezińska, Andrzej Szychowski¹

¹ *Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: k.brzezinska@tu.kielce.pl, aszychow@tu.kielce.pl*

Abstract: The paper analyses the influence of the rotational flexibility of beam-column connection on the roof plane rigidity of the longitudinally braced frame-purlin cover of the solid wall hall. The cover is adapted to obtain thermal energy from solar radiation. The roof cover is then provided in the form of a transparent glass barrier which requires considerable roof plane rigidity. The analysis aimed to compare the roof plane rigidity of the frame-purlin cover to those of space structures and truss-purlin covers, depending on the type of longitudinal bracing and rotational rigidity of the beam-column connection. The investigations were conducted for three types of roof plane bracing and different rigidity indexes of the beam-column connection (from $u=0$ – pin connection, through $u=0.25$; 0.5 ; 0.75 – semi-rigid connection, to $u=1$ – rigid connection). In the transfer of horizontal forces, the interaction of the rigidity of frames with flexible nodes (beam-column) with longitudinal roof plane bracings supported by lateral bracings of gable walls was observed. The highest roof plane rigidity was demonstrated by 2X-shaped and K-shaped braces with rigid nodes at frame corners.

Keywords: roof plane rigidity, semi-rigid connections, bracing systems, energy-active covers