ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z 104 Nr kol.1695

Witold BASIŃSKI*
Politechnika Śląska

BADANIA DYNAMICZNE DOCZOŁOWYCH WĘZŁÓW PODATNYCH W BELKACH ZE ŚRODNIKIEM FALISTYM

Streszczenie. W pracy pokazano badania doczołowych węzłów podatnych w belkach ze środnikiem falistym WTA 500 poddanych obciążeniu dynamicznemu. Obciążenie dynamiczne generowano jako wymuszenie krótkotrwałym impulsem dynamicznym. Dla badanych węzłów określono związek M(φ) na podstawie pomiaru amplitudy, prędkości kołowej i tłumienia drgań swobodnych.

DYNAMIC RESEARCH OF THE SEMIRIGID SCREW JOINTS IN THE BEAMS WITH WEB FROM CORRUGATED IRON

Summary. In this article was shown reaserch of the semirigid screw joints in the beams with web from corrugated iron WTA 500. For the semirigid screw joints have an efect dynamic load. The dynamic load was genarate as extraction short-lived dynamic impulse. For reaserch joints describe M(φ) conection on the base of measurement amplitude, circle speed and damping of proper vibration.

1. Wprowadzenie

Na rynku polskim od kilku lat produkowane i stosowane są w budownictwie metalowym dźwigary dwuteowe z falistym środnikiem. Stosowane są jako dźwigary osiowo i poprzecznie zginane, w których momenty zginające oraz siły osiowe przenoszone są przez pasy, a siły poprzeczne poprzez falisty środnik. Z uwagi na kształt środnika połączenia tychże dźwigarów wykonuje się zazwyczaj jako doczołowe sprężane na montażu. Mała nośność środnika falistego na ścinanie [6], [7] powoduje wprowadzanie wstawek z płaskich blach w obrębie połączenia.

Z dotychczasowych opisywanych w literaturze, np. [3], [4], doświadczeń wiadomo, iż wszystkie doczołowe połączenia śrubowane są odkształcalne. Na sztywność obrotową połączenia ma wpływ geometria wszystkich składowych elementów węzła, a co za tym idzie

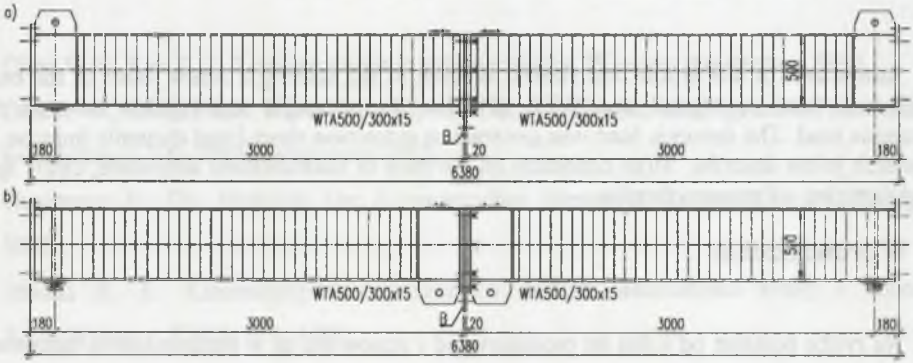
* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowal

również grubość środnika. Według [4] wraz ze zmniejszeniem grubości środnika maleje sztywność obrotowa węzła. W związku z tym zbadano doczołowy styk montażowy usytuowany w belce WTA 500 w dwóch wariantach: 1) z falistym środnikiem dochodzącym do blachy czołowej (rys.1a) oraz 2) zastąpionym płaskim środnikiem (rys. 1b). Do określenia zależności M(φ) wybrano metodę wyznaczania sztywności obrotowej doczołowych połączeń odkształcalnych na podstawie pomiaru amplitudy i prędkości kołowej tłumionych drgań swobodnych [1].

2. Program badań

2.1. Opis modeli badawczych

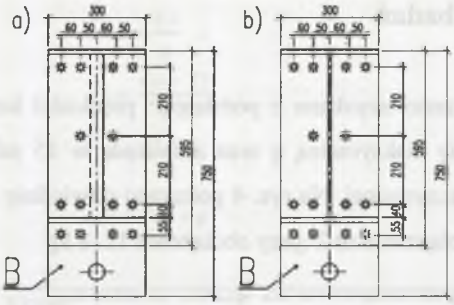
Modele badawcze zbudowano z dźwigarów dwuteowych WTA 500/300x15 ze stali St3S. W środku dźwigarów o rozpiętości 6.02 m. umieszczono doczołowy styk montażowy. Schematy statyczne badanych elementów pokazano na rys. 1.



Rys.1. Modele badawcze WTA 500/300x15: a) ze środnikiem falistym t_s=2 mm w połączeniu, b) ze środnikiem płaskim t_s=10 mm w połączeniu

Fig.1. Reaserch models WTA 500/300x15: a) with web from corrugated iron t_s=2 mm in joint, b) with flat web t_s=10mm in joint

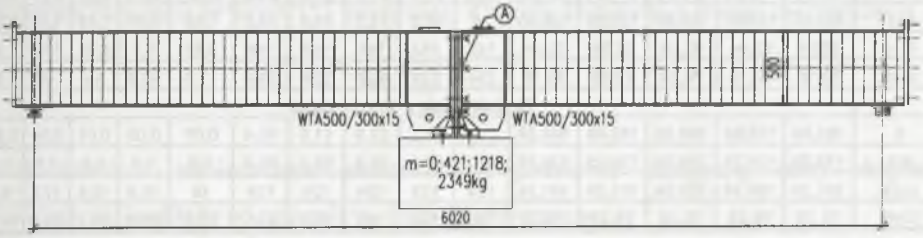
W doczołowych połączeniach wg rys. 2 dano blachy czołowe o grubości 30 mm. Połączenie sprężono śrubami M20 kl.10.9. Uzyskano nośność 401 kNm. W połączeniu nr 2 wymieniono przy styku falisty środnik na płaski gr.10 mm. Zabieg ten został podyktowany zdecydowaną różnicą sztywności postaciowej falistego środnika oraz płaskiego, co ma znaczny wpływ na sztywność obrotową połączenia. Wprowadzona dodatkowo do środka połączenia blacha B gr. 20 mm służyła do podwieszenia obciążenia masowego.



Rys.2. Badane połączenia: a) ze środnikiem falistym, b) ze środnikiem płaskim
Fig.2. Reaserch joints: a) with web from corrugated iron, b) with flat web

2.2. Metoda pomiaru drgań

W pracy [1] pokazano teoretyczną możliwość wyznaczania sztywności obrotowej połączeń odkształcalnych na podstawie pomiaru drgań swobodnych dźwigara. W niniejszej pracy udowodniono doświadczalnie możliwość wyznaczania ścieżki równowagi statycznej M(φ) doczołowego połączenia odkształcalnego. Przewidziano stopniowe zwiększanie masowego obciążenia modelu. Przygotowano obciążenia badanych dźwigarów masami 0; 421; 1218 i 2349 kg (rys. 3). W kolejnych etapach zwiększano obciążenie masą m_i i wprowadzano krótkotrwały impuls dynamiczny poprzez nagłe odjęcie podpory podtrzymującej obciążenie masowe.

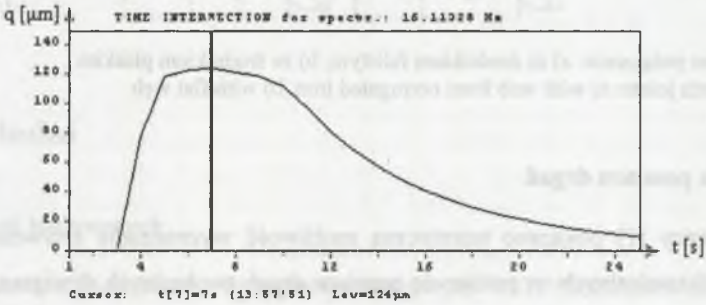


Rys.3. Obciążenia dźwigara masą m= 0;421;1218;2349 kg
Fig.3. Load of girder mass m= 0;421;1218;2349 kg

W trakcie kolejnych etapów obciążenia dźwigara wykonano pomiary prędkości kołowej drgań, przyspieszenia oraz amplitudy drgań swobodnych układu dźwigar-masa (rys. 4. a i b). Pomiary wykonano za pomocą analizatora drgań SVAN 912 AE. Czujnik analizatora podpięto w punkcie A środkowej części połączenia (rys. 3). Dla każdego obciążenia masowego dokonano rejestracji pięciokrotnie powtórzonych swobodnych drgań pionowych. Dla kontroli wykonano również pomiar drgań skrętnych towarzyszących drganiom giętnym.

3. Analiza wyników badań

W tabeli 1 zamieszczono uzyskane z pomiarów: prędkości kołowe tłumionych drgań swobodnych α, amplitudę maksymalną q oraz amplitudę w 15 sekundzie drgań, licząc od zaistnienia amplitudy maksymalnej. Na rys. 4 pokazano obwiednię amplitud q wzbudzonych drgań swobodnych dla połączenia nr 2 przy obciążeniu 1218 kg



Rys.4. Obwiednia amplitud wzbudzonych drgań swobodnych dla połączenia nr 2 przy obc. 1218 kg
Fig.4. Envelope amplitude of proper vibration for joint nr 2 with load 1218 kg

Tabela 1

	α [rad/s]					amplituda maksymalna q [μm]					amplituda w 15s q [μm]				
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Obciążenie	Środnik falisty w styku t=2mm														
0	197,88	197,88	197,88	193,28	197,88	25,5	27,1	27,7	20,8	23,8	0,009	0,08	0,05	0,21	0,09
421	128,85	128,85	128,85	128,85	128,85	74	57,5	73,2	75,8	75,8	1,48	1,01	1,48	1,03	0,89
1218	92,04	92,04	92,04	92,04	92,04	142	142	144	144	144	3,52	4,7	4,92	5,33	4,29
2349	70,16	70,16	70,16	70,16	70,16	224	224	222	227	23,8	17,6	16,8	15	18	1,87
	Środnik płaski w styku t=10mm														
0	188,68	188,68	188,68	188,68	188,68	21,1	24,2	23,9	11,8	16,4	0,01	0,08	0,01	0,04	0,01
421	139,25	139,25	139,25	139,25	139,25	69,2	69,2	69,2	69,2	68,4	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5
1218	101,24	101,24	101,24	101,24	101,24	124	123	124	123	124	16	16,6	16,6	17,2	15,8
2349	78,23	78,23	78,23	78,23	78,23	199	199	199	201	201	32,2	36,2	34,1	34,5	34,5

Na podstawie prędkości tłumionych drgań swobodnych układu obliczono okres drgań T ze wzoru (1). Korzystając z wartości kolejnych amplitud drgań wyznaczono logarytmiczny dekrement tłumienia λ ze wzoru (2). Na podstawie okresu drgań układu oraz logarytmicznego dekrementu tłumienia obliczono tłumienie ρ oraz prędkość ω nietłumionych drgań swobodnych układu (tabela 2) ze wzorów (3) i (4).

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\alpha} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{q(t+T)}{q(t)} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\alpha^2 + \rho^2} \quad (4)$$

Tabela 2

	ρ [rad/s]					ω [rad/s]				
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Obciążenie	Środnik falisty w styku t=2 mm									
0	0.5260	0.3847	0.4162	0.3045	0.3676	197.8833	197.8830	197.8831	193.2773	197.8830
421	0.2625	0.2703	0.2609	0.2875	0.2973	128.8495	128.8496	128.8495	128.8496	128.8496
1218	0.2476	0.2283	0.2261	0.2208	0.2353	92.0364	92.0364	92.0364	92.0364	92.0364
2349	0.1706	0.1737	0.1807	0.1700	0.1706	70.1583	70.1583	70.1583	70.1583	70.1583
	Środnik płaski w styku t=10 mm									
0	0.6193	0.3785	0.6276	0.3815	0.6717	188.6788	188.6782	188.6788	188.6782	188.6790
421	0.2404	0.2404	0.2440	0.2519	0.2554	139.2544	139.2544	139.2544	139.2545	139.2545
1218	0.1371	0.1341	0.1346	0.1317	0.1379	101.2411	101.2411	101.2411	101.2411	101.2411
2349	0.1221	0.1142	0.1182	0.1181	0.1181	78.2320	78.2320	78.2320	78.2320	78.2320

3.1. Wyznaczenie zastępczej masy skupionej

W celu oszacowania przemieszczenia giętnego i postaciowego układu masę ciągłą dźwigara zamieniono na masę skupioną m_z umieszczoną w środku rozpiętości belki. Redukcję obciążenia obliczono ze wzoru (5), korzystając z zasady zachowania energii mechanicznej.

$$m_z = \frac{17 \cdot q \cdot L}{35} \quad (5)$$

W tabeli 3 zamieszczono obliczone na podstawie zastępczej masy skupionej przemieszczenia układu od zginania y_M i siły poprzecznej y_Q.

Tabela 3

Srodnik falisty w styku t=2 mm			Srodnik płaski w styku t=10 mm		
mz[kg]	yM[mm]	yQ[mm]	mz[kg]	yM[mm]	yQ[mm]
396	0.1394	0.0665	466	0.1582	0.0782
852	0.2999	0.1430	922	0.3129	0.1548
1649	0.5804	0.2768	1719	0.5834	0.2885
2780	0.9784	0.4666	2850	0.9672	0.4783

3.2. Wyznaczenie sztywności obrotowej C_φ badanych połączeń

Kąt obrotu połączenia doczołowego wspornika wg rys. 5 możemy zapisać wzorem (6). Natomiast kąt obrotu połączenia w środku rozpiętości belki swobodnie podpartej wzorem (7)

$$\phi = \frac{2\cdot(y - y_M - y_Q)}{L}, \tag{6}$$

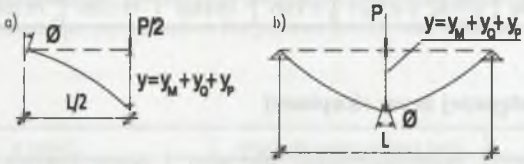
$$\phi = \frac{4\cdot(y - y_M - y_Q)}{L}, \tag{7}$$

gdzie:
y - przemieszczenie całkowite końca wspornika lub środka belki,
y_M - przemieszczenie od zginania końca wspornika lub środka belki,
y_Q - przemieszczenie od siły poprzecznej końca wspornika lub środka belki.

Związek między momentem zginającym w doczołowym połączeniu podatnym a kątem obrotu połączenia możemy zapisać w postaci (5):

$$M = C_\phi \cdot \phi \cdot \tag{8}$$

Należy nadmienić, że sztywność obrotowa C_φ połączenia odkształcalnego jest nieliniowo zależna od obciążenia m_z.



Rys.5. Kąt obrotu doczołowego połączenia podatnego pod obciążeniem skupionym związany z przemieszczeniem wywołanym momentem, siłą tnącą oraz obrotem połączenia dla: a) belki wspornikowej, b) belki swobodnie podpartej
Fig.5. Agle of revolution of semirigid joint with concentrated load conected with dislocation cause of the moment, shering force and revolution joint for: a) cantilever beam b) hinged beam

Związek między sztywnością obrotową C_φ a sztywnościami C, C_M, C_Q ma postać (9) [1]. Sztywność całkowitą C układu wyznaczono ze wzoru (10) na podstawie prędkości kołowej drgań swobodnych. Sztywność giętną C_M i postaciową C_Q obliczono na podstawie przemieszczenia giętnego y_M i postaciowego y_Q belki.

$$C_\phi = \frac{1}{\frac{1}{C} - \frac{1}{C_M} - \frac{1}{C_Q}} \frac{L^2}{16}, \tag{9}$$

gdzie:

$C = \omega^2 \cdot m_z$ - sztywność całkowita układu, (10)

$C_M = \frac{m_z \cdot g}{y_M}$ - sztywność giętna układu, (11)

$C_Q = \frac{m_z \cdot g}{y_Q}$ - sztywność postaciowa układu. (12)

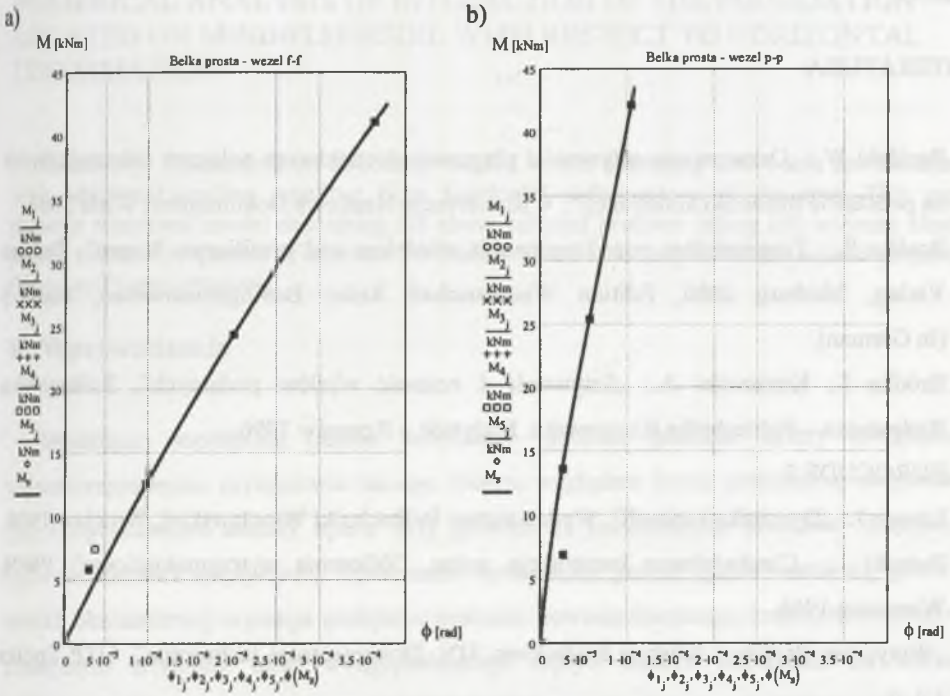
Sztywności obrotowe C_φ badanych połączeń zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4

	Sztywność obrotowa Cφ [kNm/rad]											
	Środnik falisty w styku t=2 mm						Środnik płaski w styku t=10 mm					
Nr pomiaru	1	2	3	4	5	Cφśr	1	2	3	4	5	Cφśr
0	197680	197676	197677	155493	197676	189241	265300	265287	265300	265287	265303	265295
421	128099	128099	128099	128100	128100	128099	538816	538816	538817	538818	538819	538817
1218	121871	121870	121870	121870	121870	121870	449888	449887	449887	449887	449888	449887
2349	112813	112813	112813	112813	112813	112813	403601	403600	403601	403601	403601	403601

Na podstawie zależności (7) oraz (8) obliczono kąty obrotu oraz momenty zginające w badanych połączeniach. Za pomocą nieliniowej krzywej regresji wyrównano empiryczną zależność M(φ) (rys. 6 a i b). Jako funkcję sterującą przyjęto wielomian (13). Z analizy wielomianowej krzywej regresji wynikło, iż niezerowe współczynniki przy zmiennych niezależnych M_i występują w wielomianie sterującym trzeciego stopnia. Różne od zera współczynniki wielomianu obliczono używając metody najmniejszych kwadratów.

$$\phi_i = a\cdot(M_i)^1 + b\cdot(M_i)^2 + c\cdot(M_i)^3 \cdot \tag{13}$$



Rys.6. Zależność M(φ): a) dla węzła ze środnikiem falistym, b) dla węzła ze środnikiem płaskim
Fig.6. Relationship M(φ): a) for joint with web from corrugated iron, b) for joint with flat web

Sztywność obrotową badanych połączeń udało się wyznaczyć w zakresie początkowym dla obciążenia równego ~10% nośności połączenia. Na rys. 6a pokazano ścieżki równowagi statycznej M(φ) połączenia o środniku falistym dochodzącym do blachy czołowej oraz na rys. 6b połączenia z odcinkiem środnika płaskiego. Wykresy przedstawiają wartości z pięciu pomiarów zaznaczone punktowo oraz wyrównaną empirycznie krzywą M(φ).

4. Wnioski

Wyniki badań doczołowych styków montażowych potwierdzają możliwość zastosowania i przydatność metody dynamicznej do wyznaczania sztywności obrotowej połączeń odkształcalnych w konstrukcjach już zrealizowanych. Możliwe jest również określanie sztywności obrotowych C_φ oraz konstruowanie ścieżek równowagi statycznej M(φ) doczołowych połączeń odkształcalnych na podstawie pomiarów drgań swobodnych.

Przeprowadzone badania potwierdziły również to, iż sztywność obrotowa połączeń doczołowych w belkach ze środnikiem falistym dochodzącym do blachy czołowej jest znacząco mniejsza od sztywności połączenia dźwigara z odcinkiem środnika płaskiego (tab.4).

LITERATURA

1. Basiński W.: „Oszacowanie sztywności obrotowej doczołowych połączeń odkształcalnych na podstawie dynamiki konstrukcji", V Konferencja Naukowa Doktorantów, Wisła 2004.
2. Brańka P.: „Tragverhalten von Tragern mit schalnken und profilierten Stegen", Tectum Verlag, Marburg 2000, Edition Weissenschaft Reihe Bauingenieurwesen, band 5 (in German)
3. Bródka J., Kozłowski A.: „Sztywność i nośność węzłów podatnych", Politechnika Białostocka – Politechnika Rzeszowska. Białystok – Rzeszów 1996.
4. EUROCODE 3
5. Langer J.: „Dynamika budowli". Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.
6. Rutecki J.: „Cienkościenne konstrukcje nośne. Obliczenia wytrzymałościowe", PWN, Warszawa 1966.
7. „Wytyczne: Profile z falistym środnikiem SIN. Dokumentacja techniczna", GZP Spółka z o. o.

Recenzent: Prof. dr inż. Roman Jankowiak