

Ścieżki równowagi statycznej uźbrowanych dźwigarów SIN The static equilibrium paths in ribbed SIN girders

Witold Basiński¹. Zbigniew Kowal^{2*}

¹ Department of Building Structures,
Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology
Ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
e-mail: witold.basinski@polsl.pl

² Department of Structure Mechanics, Metal Structures and Computer Methods
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology
Al. 100-lecia PP 7. 25-323 Kielce
e-mail: zbigko@tu.kielce.pl

Abstrakt. W pracy pokazano badania wpływu sztywności giętej żeber podporowych na nośność sztywność i ugięcia dźwigarów SIN. Badania doświadczalne przeprowadzono na modelach wykonanych z dźwigarów WTA, WTB i WTC o wysokości średnika 1000, 1250 i 1500 mm zbudowanych z elementów wysyłkowych łączonych doczołowo. Dźwigary obciążono symetrycznie dwoma siłami skupionymi. Wyznaczono ścieżki równowagi statycznej przemieszczeń globalnych oraz wyodrębniono składową przemieszczeń postaciowych badanych dźwigarów. Wykazano, że stosowanie sztywnych żeber podporowych w dźwigarach SIN zmienia sztywność postaciową falistego średnika oraz zwiększa globalną nośność krytyczną dźwigara.

Abstract. The paper presents experimental investigations into the influence of the bending stiffness of support ribs on resistance, transverse stiffness and deflections of SIN girders. Experimental investigations were conducted on two groups of models made of WTA, WTB and WTC girders 1000, 1250 and 1500 mm in height, made of shipment elements joined by end-plate connections. The girders were loaded symmetrically by two concentrated forces. The static equilibrium paths of global deflections were determined and a transverse deflection component for the girders under examination was isolated. It was demonstrated that using stiff support ribs in SIN girders changing corrugated web stiffness and increases the global critical resistance of the girder.

Słowa kluczowe: dźwigary z falistym średnikiem, żebrowanie, przemieszczenie postaciowe
Keywords: SIN girders, stiff and semirigid support ribs, transverse deflections

1. Wstęp

Dźwigary SIN są ustrojami statycznie wewnętrznie niewyznaczalnymi, w których momenty zginające przenoszą pasy a siły poprzeczne falisty średnik. Badania nośności dźwigarów SIN można znaleźć w publikacjach [1, 2, 3].

W wytycznych [4] nie przewidziano potrzeby wzmocnienia podporowych skrajnych żeber. W niniejszej pracy pokazano wpływ żeber podporowych na nośność i sztywność postaciową falistego średnika. Przeanalizowano zgodność przemieszczeń postaciowych y_{Vt} , wyznaczonych na podstawie pracy [4] z wyznaczonymi eksperymentalnie y_V dla dźwigarów z żebrami podatnymi oraz sztywnymi. Badania doświadczalne przeprowadzono na dźwigarach WTA, WTB i WTC o wysokości średnika 1000, 1250 i 1500 mm zbudowanych z elementów wysyłkowych łączonych doczołowo.

2. Badania doświadczalne

Z badań przedstawionych w pracy [1] wynika, że przy $a > h$ (Fig. 1) naprężenia krytyczne τ_{cr} w falistym średniku zależą od wysokości średnika h a nie od długości przedziału a . Zauważono, że w przypadku doczołowego połączenia elementów wysyłkowych za pomocą śrub, strefa postaciowej utraty stateczności średnika odsuwała się od połączenia. W związku z tym przebadano dwie grupy modeli. W I grupie modeli przebadano cztery dźwigary (Fig. 1a) złożone z elementów wysyłkowych długości 3175 i 1500 mm, których zakończenia stanowiły blachy podporowe grubości 25 mm

1. Introduction

SIN girders are statically internally indeterminate structures, in which bending moments are transferred by flanges and transverse forces are transferred by the corrugated web. Investigations into the strength of SIN girders can be found in [1, 2, 3].

Guidelines [4] do not indicate it is necessary to strengthen the edge support ribs. The paper shows the impact of support ribs on the resistance and shear modulus of the corrugated web. The congruence between transverse deflections y_{Vt} determined in accordance with study [4] and the experimentally determined $y(V)$ for girders with stiff and semirigid support ribs was analysed. Experimental investigations were conducted for WTA, WTB and WTC girders, with the web 1000, 1250 and 1500 mm in height/ depth, made of shipment elements joined by end-plates.

2. Experimental investigations

The experimental investigations presented in [1] indicate that for $a > h$ (Fig. 1), the critical stress τ_{cr} in the corrugated web depends on the web height h and not on the range length a . It was observed that when the shipment elements are joined with bolted end-plates, the zone of in-plate stability loss of the web was shifted from the joint. Consequently, two groups of models were examined. In the model group I, the investigations covered four girders (Fig. 1a) composed of shipment elements 3175 and 1500 mm in length, the ends of which were support plates, 25

*Referat został oparty na badaniach finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki (grant No. N N506 072538).

*The paper was based on the investigations funded by the National Science Centre (Grant No. N N506 072538).

spełniające funkcje żeber podatnych (Fig. 1c). W II grupie zbadano cztery modele złożone z elementów wysyłkowych 2175 i 1500 mm (Fig. 1 b). Do czołowych blach podporowych dokręcono teowniki (Fig.1d) w celu zwiększenia sztywności żeber podporowych. Elementy wysyłkowe dźwigarów łączono doczołowo na śruby M 24 kl. 10.9. Środniki dźwigarów wykonano ze stali S 235, natomiast pasy ze stali S 275.

mm in thickness, acting as semirigid ribs (Fig. 1c). In group II, four models composed of shipment elements 2175 and 1500 mm (Fig. 1 b) were investigated. T bars were fastened to the support end plates (Fig.1d) to increase the stiffness of the support ribs. The girder shipment elements were joined with end plates using M 24 class 10.9 bolts. Girder webs were made of S 235 steel, whereas flanges were from S 275 steel.

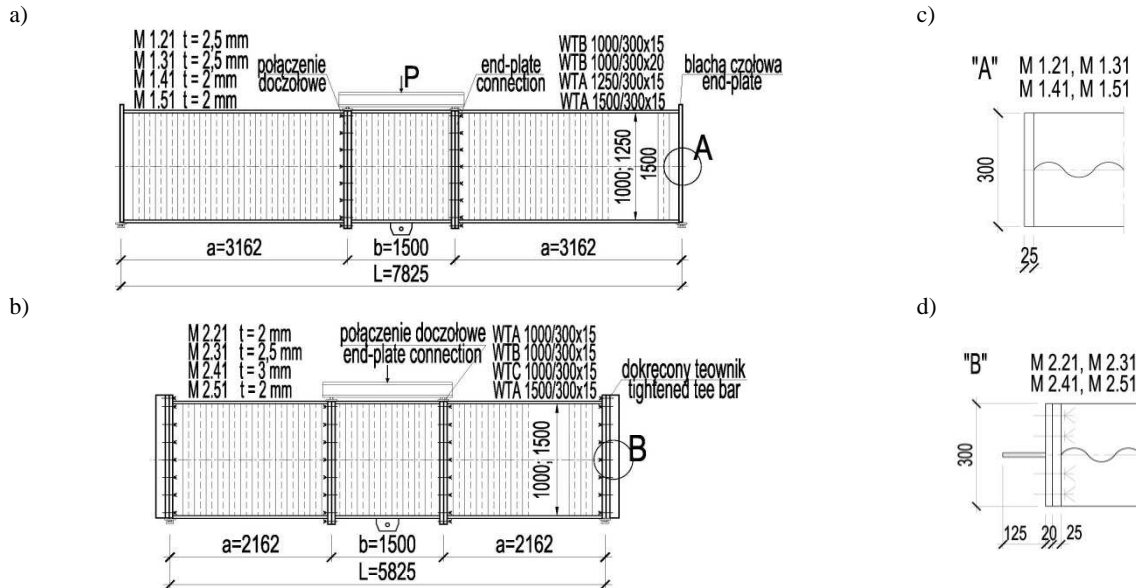


Fig. 1. Dźwigary z falistym środnikiem: a) z blachą czołową 300x25 mm, b) z blachą czołową usztywnioną teownikiem, c) przekrój żebra podporowego A, d) przekrój żebra podporowego B.

Fig 1. The models of girders with corrugated webs: a) group I with the end plate 300x25 mm, b) group II with T-bar stiffened end plate, c) A support rib detail, d) B support rib detail.

3. Ścieżki równowagi statycznej dźwigarów SIN z żebrzem sztywnym i podatnym

Przemieszczenia y_V spowodowane siłą poprzeczną wyznaczono ze wzoru (1) [4]:

$$y_V = y - y_M, \tag{1}$$

gdzie: y – pomierzone przemieszczenie globalne.

Oczekiwane na podstawie [4] przemieszczenie y_M od zginania momentem M wyznaczono z zależności (2):

$$y_M = Pa(3L^2 - 4a^2) / 24EI_y, \tag{2}$$

gdzie: I_y – moment bezwładności przekroju dźwigara z pominięciem środnika [4].

Wirtualną (oczekiwaną) nośność graniczną N_p mierzoną obciążeniem P na podstawie przekroju pasów oszacowano z wzoru (3) [4]:

$$N_p = f_{ymin} h A_p 2/a, \tag{3}$$

gdzie: f_{ymin} – granica plastyczności stali z badań materiałowych próbek pasów poszczególnych modeli dźwigarów, A_p – przekrój pasa dźwigara, h – wysokość dźwigara w osiach pasów

3. Transverse equilibrium paths of SIN girders with stiff and semirigid rib

Deflections y_V caused by a transverse force were determined from formula (1) [4]:

where: y – measured global deflections.

Expected, on the basis of [4], deflection y_M resulting from bending with moment M was determined from dependence (2):

where: I_y – moment of inertia of the girder section when the web is disregarded [4].

Virtual (expected) ultimate resistance N_p measured with load P on the basis of the flange section was estimated from formula (3) [4]:

where: f_{ymin} – steel yield point obtained from tests on samples of the material collected from flanges of individual girder models, A_p – girder flange section, h – girder height along the flange axes.

Na rysunku 2 pokazano globalne SRS $P(y)$ z pomiarów przemieszczeń badanych dźwigarów M 1.51 z zębem podatnym oraz M 2.51 ze sztywnym zębem podporowym.

Oczekiwane SRS $P(y_M)$ od zginania oraz $P(y_V)$ od sił poprzecznych wyznaczone w obszarze sprężystym oznaczono na rysunku 2 linią ciągłą. Linią przerywaną pokazano teoretyczny przebieg ścieżek od zginania $P(y_M)$ i od sił poprzecznych $P(y_V)$ przy założeniu sprężystej pracy pasów dźwigarów po utracie stateczności środknika.

Pokazane na rysunku 2 współrzędne charakterystyczne $P_1(y_1)$, $P_2(y_2)$ oraz $P_3(y_3)$ zaznaczone na SRS dotyczą: $P_1(y_1)$ – początku niestateczności środknika, $P_2(y_2)$ – globalnej nośności dźwigara sygnalizowanej zakończeniem formowania pola ciągnięć ($N_{gr} = 2V_{gr}$), $P_3(y_3)$ – odciążenia dźwigara. Współrzędna $P_4(y_{M4})$ na SRS $P(y_M)$ pokazuje potencjalną (wirtualną) sprężystą nośność graniczną dźwigara N_p oczekiwaną na podstawie nośności sprężystej pasów $\sigma = f_{ymin}$ [4].

W tablicy 1 zestawiono współrzędne charakterystyczne badanych dźwigarów. W kolumnie 2 zamieszczono granicę plastyczności z badań materiałowych próbek pasów dźwigarów, w kolumnie 3 - nośność graniczną modeli dźwigarów z warunku zniszczenia, w kolumnie 4 - pomierzone przemieszczenie globalne, w kolumnie 5 - sprężyste przemieszczenia od momentów zginających i 6 - od sił poprzecznych wyznaczone dla współrzędnej $P_1(y_1)$, w kolumnie 7 i 8 pokazano stosunek przemieszczeń postaciowych do przemieszczeń giętych y_V/y_M oraz do globalnych y_V/y w obszarze sprężystym.

Fig.2 shows global SEPs $P(y)$ obtained from measurements of deflections of the girders examined, namely M 1.51 with a semirigid, and M 2.51 with a stiff support rib.

In Fig. 2, expected SEPs $P(y_M)$ under bending and $P(y_V)$ under the action of transverse forces, determined in the elastic region, are represented with a continuous line. A broken line denotes the theoretical pattern of paths under bending $P(y_M)$ and under transverse forces $P(y_V)$ at the assumption of elastic behaviour of the girder flanges after the web stability loss.

Shown in Fig. 2. characteristic points $P_1(y_1)$, $P_2(y_2)$ and $P_3(y_3)$ marked in the SEP refer to: $P_1(y_1)$ – the beginning of the web instability, $P_2(y_2)$ – global resistance of the girder indicated by the end of the formation of the tension zone/ field ($N_{gr} = 2V_{gr}$), $P_3(y_3)$ – the girder unloading. The point $P_4(y_{M4})$ in the SEP $P(y_M)$ represents the potential (virtual) elastic ultimate resistance of the girder N_p , which can be predicted on the basis of the elastic resistance of the flanges $\sigma = f_{ymin}$ [4].

Characteristics of the girders of concern are listed in Table 1. Column 2 shows yield points obtained from tests on samples of the material collected from girder flanges, column 3 gives the ultimate resistance of girder models which results from the failure condition, column 4 – measured global deflections, column 5 – elastic deflections under bending moments, and column 6 - elastic deflections under the action of transverse forces determined for the point $P_1(y_1)$. Columns 7 and 8 show the ratio of transverse deflections to flexural deflections y_V/y_M and to global deflections y_V/y in the elastic region.

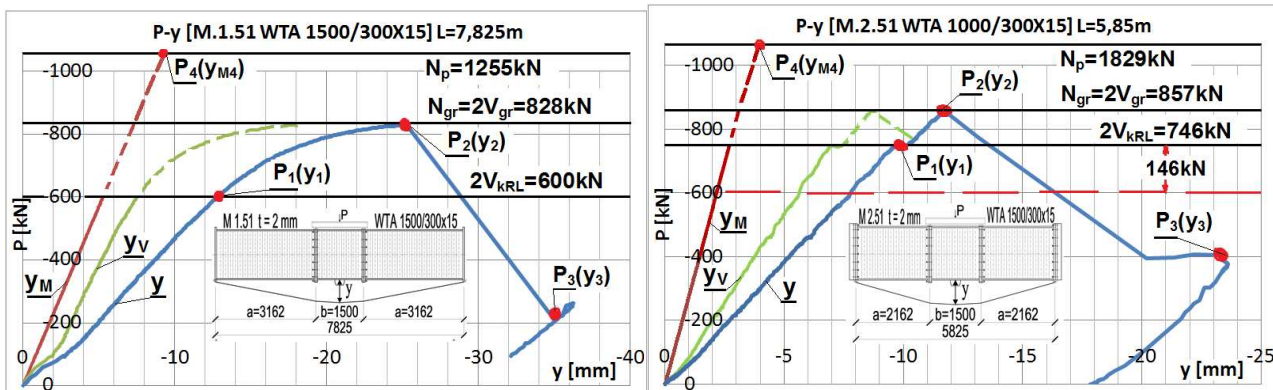


Fig. 2. Ścieżki równowagi statycznej $P(y)$, $P(y_V)$, $P(y_M)$: a) modelu M 1.51 z podporowym zębem podatnym. b) modelu M 2.51 z podporowym zębem sztywnym.

Fig. 2. Static equilibrium paths $P(y)$, $P(y_V)$ and $P(y_M)$: a) model M 1.51 with a semirigid support rib b) model M 2.51 with a stiff support rib.

Tabela 1. Nośność graniczna $P_2(y_2)$ i przemieszczenia badanych modeli dźwigarów w punkcie $P_1(y_1)$ w środku rozpiętości.

Table 1. Ultimate resistance (point $P_2(y_2)$) and deflections of the girder models at point $P_1(y_1)$ at the mid-span.

Model	1	2	3	4	5	6	7	8
M 1.21	300x25 mm	$f_{yp} =$ 303.4 MPa	$N_{gr} =$ 725 kN	$y =$ 18.0 mm	$y_M =$ 10.9 mm	$y_V =$ 7.1 mm	$y_V/y_M =$ 0.65	$y_V/y =$ 0.39
M 1.31	300x25	298.9	745	17.2	8.9	8.3	0.93	0.48
M 1.41	300x25	281.2	745	15.7	7.8	7.9	1.01	0.50
M 1.51	300x25	291.1	828	12.8	5.3	7.5	1.42	0.59
M 2.21	300x25 + T bar	322.0	621	10.9	4.6	6.3	1.37	0.58
M 2.31	300x25 + T bar	328.0	894	13.0	5.9	7.1	1.20	0.55
M 2.41	300x25 + T bar	326.7	1035	13.0	6.6	6.4	0.97	0.49
M 2.51	300x25 + T bar	290.3	857	10.1	2.7	7.4	2.74	0.70

Wpływ przemieszczeń postaciowych na przemieszczenia globalne rośnie wraz ze zwiększeniem wysokości dźwigara. Podporowe żebra sztywne zwiększają nośność krytyczną dźwigara.

The impact of transverse deflections on global deflections grows together with an increase in the girder height. Stiff support ribs enhance the critical girder resistance.

4. Oszacowanie zgodności pomierzonych przemieszczeń postaciowych z teoretycznymi

4. Estimation of congruence between measured and theoretical transverse deflections

Teoretyczne przemieszczenia postaciowe y_{vt} od sił poprzecznych badanych dźwigarów wg [4] wynoszą (4):

In accordance with [4], theoretical transverse deflections y_{vt} of the girders under transverse forces amount to (4):

$$y_{vt} = \mu_{inc} Va/GA, \tag{4}$$

gdzie: $\mu_{inc} = A/0.85A_w$ – współczynnik ścinania przekroju wg [4], V – siła poprzeczna; a – odległość przekroju od lewej podpory, A – powierzchnia przekroju dźwigara.

where: $\mu_{inc} = A/0.85A_w$ – the shear coefficient of the section in accordance with [4], V – transverse force; a – the section distance from the left support, A – the girder section area.

W tabelicy 2 zamieszczono: wymiary żebra podporowego (kol.1), pole przekroju środnika $A_w = h_w t_w$ (kol.2), granicę plastyczności środników dźwigarów (kol.3), rzeczywiste sztywności postaciowe K dźwigarów (kol.4), przemieszczenia teoretyczne y_{vt} od sił poprzecznych w dźwigarach (kol.5), stosunek przemieszczeń postaciowych uzyskanych na podstawie badań do przemieszczeń teoretycznych y_v/y_{vt} (kol.6).

Table 2 presents the following: the support rib dimensions (column 1), the web section area $A_w = h_w t_w$ (column 2), yield points of the girder webs (column 3), the actual girder shear moduli K (column 4), theoretical deflections y_{vt} under transverse forces in the girders (column 5), and the ratio of transverse deflections obtained from tests to theoretical deflections y_v/y_{vt} (column 6).

Tabela 2. Porównanie pomierzonych przemieszczeń postaciowych z teoretycznymi wyznaczonymi z (4) [4].

Table 2. Comparison between transverse deflections obtained from tests and theoretical deflections determined from (4) [5]

Model	1	2	3	4	5	6
M 1.21	300x25 mm	$A_w = 100 \times 0.25 = 25 \text{ cm}^2$	$f_{ys} = 276 \text{ MPa}$	$K = 256410 \text{ kN}$	$y_{vt} = 5.3 \text{ mm}$	$y_v/y_{vt} = 1.34$
M 1.31	300x25	$100 \times 0.25 = 25$	260.4	230704	5.7	1.47
M 1.41	300x25	$125 \times 0.20 = 25$	317.8	240577	5.6	1.42
M 1.51	300x25	$150 \times 0.20 = 30$	247.2	252257	4.7	1.61
M 2.21	300x25 + T bar	$100 \times 0.20 = 20$	334.3	196735	4.6	1.39
M 2.31	300x25 + T bar	$100 \times 0.25 = 25$	340.8	226237	4.7	1.51
M 2.41	300x25 + T bar	$100 \times 0.30 = 30$	325.5	277434	4.4	1.45
M 2.51	300x25 + T bar	$150 \times 0.20 = 30$	289.3	220036	4.0	1.87

5. Wnioski

5. Conclusions

Usztywnienie skrajnego żebra profilem teowym znacząco zwiększa postaciową nośność krytyczną falistych środników dźwigarów SIN.

The stiffening of the edge rib with a T-profile substantially increases the transverse critical resistance of corrugated webs of SIN girders.

Zwiększenie sztywności żeber skrajnych wpływa na zwiększenie przedziału odwracalnych nośności i przemieszczeń sprężystych a zarazem sprzyja lepszemu wykorzystaniu pasów w globalnej nośności granicznej dźwigarów SIN. W przytoczonych badaniach granice plastyczności stali środników na rozciąganie okazały się znacząco większe od nominalnej podawanej przez producenta wynoszącej $f_y = 215 \text{ MPa}$ [4].

An increase in the stiffness of edge ribs contributes to the increase in the range of reversible resistances and elastic deflections. Thus, that facilitates the performance of flanges in the global ultimate resistance of SIN girders. In the tests, the yield points of steel webs working in tension turned out to be substantially greater than the nominal value quoted by the manufacturer, which was $f_y = 215 \text{ MPa}$ [4].

Literatura • References

[1] Basiński W., Kowal Z.. (2013). *Wpływ sztywności blach czołowych na postaciową wytrzymałość krytyczną dźwigarów o falistym środniku*. Konstrukcje Stalowe. No. 3. 2013. s. 50-54.

[2] Kuchta K.. (2004). *Nośność i sztywność blachownic o falistych środnikach*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków 2004.

[3] Pasternak H., Brańka P.. (1999). *Tragverhalten von Wellstegtragern unter lokaler Lasteinleitung*. Bauingenieur No. 5. 1999.

[4] *Profile z falistym środnikiem SIN. Zasady wymiarowania*. Politechnika Krakowska. Kraków 2002.

[5] PN-EN 1993-1-5.(2008). Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5. Blachownice*.