

Edyta BŁYSKAL¹
Lucjan ŚLĘCZKA²

BADANIA DOŚWIADCZALNE ROZCIĄGANYCH KĄTOWNIKÓW ŁĄCZONYCH ZA POMOCĄ JEDNEJ ŚRUBY

Podczas projektowania elementów rozciąganych, w stalowych konstrukcjach budowlanych, bardzo często wykorzystywane są kątowniki równoramienne lub nierównoramienne. Najczęstszą formą ich mocowania, wynikającą z kształtu przekroju poprzecznego, jest łączenie za pomocą tylko jednego ramienia, przy użyciu jednej lub większej liczby śrub. W takiej sytuacji, na nośność przekroju przy rozciąganiu znacząco wpływają takie czynniki, jak: mimośród obciążenia, stworzony warunkami mocowania, oraz osłabienie ścianki przylgowej otworami na łączniki. W pracy przedstawiono metodykę przeprowadzenia i otrzymane rezultaty doświadczalnej weryfikacji nośności kątowników mocowanych za pomocą tylko jednej śruby. Przebadano ogółem 22 elementy próbne, którymi były kątowniki pojedyncze lub podwójne, łączone do blach węzłowych. Zastosowano trzy rozmiary kątowników (L50x5, L60x6 oraz L80x6), rozpatrzono średnice śrub w zakresie M12÷M22 oraz różnicowano położenie osi otworu względem bocznego brzegu ramienia kątownika. Otrzymane rezultaty pozwoliły na weryfikację rozbieżnych podejść obliczeniowych zawartych w normach. W szczególności odniesiono się do zapisów zawartych w normie do projektowania połączeń w stalowych konstrukcjach budowlanych PN-EN 1993-1-8 oraz zaleceń w normie dotyczącej projektowania stalowych konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia PN-EN 50341-1.

Słowa kluczowe: kątowniki, przekrój osłabiony, rozciąganie mimośrodowe, połączenia śrubowe

1. Wprowadzenie

Kątowniki, równoramienne lub nierównoramienne, są bardzo często wykorzystywane jako elementy rozciągane osiowo w projektowaniu i wykonawstwie stalowych konstrukcji budowlanych. Najczęstszą formą mocowania takich elementów, wynikającą z kształtu ich przekroju poprzecznego, jest łączenie tylko za pomocą jednego ramienia (przylgowego), podczas gdy drugie ramię (odstają-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Edyta Błyskal, Politechnika Rzeszowska, edytabliskal@prz.edu.pl

² Lucjan Ślęczka, Politechnika Rzeszowska, sleczka@prz.edu.pl

ce) pozostaje niezamocowane. Jeśli stosowanymi łącznikami są śruby, dodatkowo dochodzi do osłabienia przekroju poprzecznego ścianki przyłgowej. Oba te wpływy (mimośród mocowania oraz osłabienie przekroju poprzecznego jednej ścianki) wywołują powstanie momentu zginającego, który obciąża połączenie i łączone ze sobą elementy. Nierównomierny rozkład naprężeń w obszarze połączenia (w elemencie, który jest nominalnie osiowo rozciągany) nazywany jest z angielska „shear lag effect” [1] i powinien być uwzględniony przy wyznaczaniu nośności mocowanych w taki sposób kształtowników.

Współczesne normy projektowania [5], [7] pozwalają obliczać nośność mocowanych w ten sposób elementów, jako nominalnie rozciąganych, z pominięciem pracochłonnego wyznaczania powstających efektów zginania i koncentracji naprężeń, jednakże przy istotnej redukcji nośności obliczeniowej przekroju poprzecznego pręta.

Najbardziej udokumentowane badania tego zjawiska przeprowadzono w Ameryce Północnej [2], [3], [9], [10]. Europejskie badania w tym zakresie są daleko mniej liczne [4]. Pomimo mniejszej liczby badań, przepisy wprowadzane w normach europejskich odbiegają od uregulowań amerykańskich. Dodatkowo, wprowadzane w życie przepisy europejskie ujmują zagadnienie nośności kątowników mocowanych jednym ramieniem bardzo niejednolicie. W szczególności istnieje różnica pomiędzy zapisami w normie PN-EN 1993-1-8 [7], a zapisami w normie dotyczącej projektowania stalowych konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia PN-EN 50341-1 [8], prowadząca do znacznej rozbieżności otrzymywanych nośności.

Ta zauważalna różnica we wspomnianych wyżej zapisach norm [7] oraz [8] dotyczących nośności kątowników mocowanych jednym ramieniem, była bezpośrednią inspiracją do przeprowadzenia badań własnych. W niniejszej pracy przedstawiono zastosowaną metodykę oraz wyniki badań kątowników mocowanych tylko za pomocą jednej śruby.

2. Podejścia obliczeniowe stosowane w przepisach krajowych

Kątownik mocowany jednym ramieniem może być traktowany jako rozciągany osiowo, przy odpowiedniej redukcji jego powierzchni przekroju poprzecznego. W przypadku kątowników mocowanych za pomocą jednej śruby w przepisach krajowych są stosowane aktualnie dwa podejścia obliczeniowe. Według zapisów normy PN-EN 1993-1-8/3.10.3 [7], nośność obliczeniowa takiego elementu określona jest poniższą zależnością:

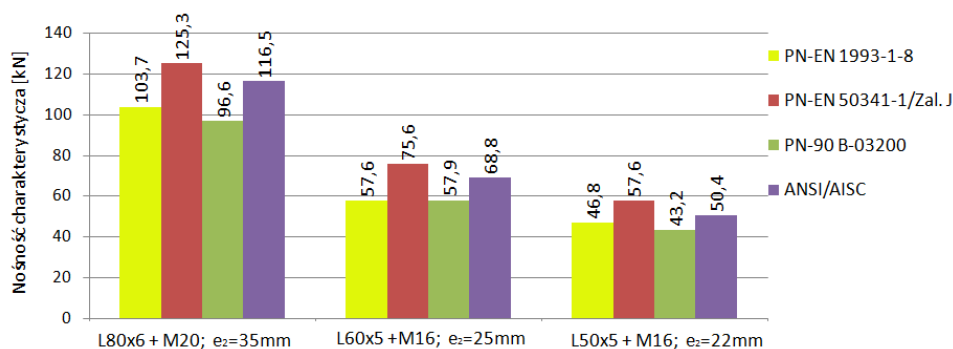
$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5 d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (1)$$

Natomiast korzystając z normy PN-EN 50341-1/Załącznik J [8] tę samą nośność należy ustalać za pomocą wyrażenia:

$$N_{u,Rd} = \frac{(b_1 - d_0) t f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (2)$$

gdzie: d_0 – średnica otworu na śrubę, e_2 – odległość boczna do osi otworu (mierzona prostopadle do kierunku obciążenia), t – grubość ścianki kątownika, f_u – granica wytrzymałości stali, b_1 – szerokość przyłgowego ramienia kątownika.

Na rys. 1 pokazano porównanie nośności charakterystycznych rozciąganych kątowników o różnych rozmiarach, mocowanych jedną śrubą. W porównaniu uwzględniono nośności wyznaczone za pomocą zależności (1) oraz (2), a także zapisy normy PN-90/B-03200 [5] oraz normy amerykańskiej [1]. Można zauważyć istotne zróżnicowanie otrzymanych wyników, w szczególności pomiędzy zależnościami (1) i (2).



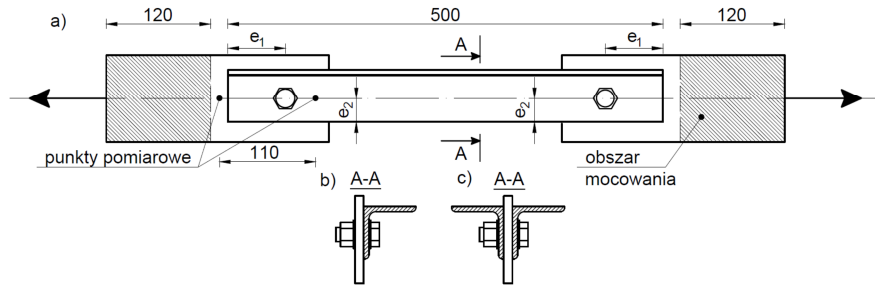
Rys. 1. Porównanie nośności charakterystycznej kątowników mocowanych jedną śrubą, według różnych przepisów (stal gatunku S235)

Fig. 1. Comparison of characteristic tension resistance of angle members connected by one bolt, according to different codes (steel grade S235)

3. Opis badanych elementów

Do badań wykorzystano 22 elementy wykonane z kątowników równoramiennych o rozmiarach L50x5, L60x6 i L80x6 o długości 500 mm każdy. Kątowniki były łączone tym samym ramieniem do dwóch blach węzłowych (bl.10x100), za pomocą jednego łącznika śrubowego w każdym styku. Schemat elementów badawczych pokazano na rys. 2, a ich pełen opis w tabeli 1.

Na elementy badawcze zastosowano kątowniki pojedyncze lub zdwojone (rys. 2), łączone z blachami węzłowymi za pomocą śrub o średnicach od M12 do M22. Wszystkie wykorzystane śruby były klasy 8.8 i posiadały gwint na całej długości trzpienia. Stosowane połączenia były kategorii A, według PN-EN 1993-1-8 [7], lecz przy zakręcaniu sprężono śruby do niewielkiej wartości, w celu ujednolicenia wykonania połączeń (ok. 30% wartości odpowiedniego momentu dokręcenia, jak dla połączeń sprężanych).



Rys. 2. Element badawczy: a) widok, b) przekrój poprzeczny elementu z pojedynczym kątownikiem, c) przekrój poprzeczny elementu z dwoma kątownikami

Fig. 2. Test specimen: a) general view, b) cross section of specimen with single angle member, c) cross section of specimen with double angle member

Tabela 1. Opis elementów badawczych

Table 1. Description of test specimens

Lp.	Symbol	Kątownik(i)	Śruba	e_2 [mm]	e_1 [mm]	Nośność graniczna N_{exp} [kN]
1.	D80/22/29	2 x L80x6	M22	29	75	239,3
2.	J80/22/29	1 x L80x6	M22	29	75	133,6
3.	J80/22/32	1 x L80x6	M22	32	75	132,1
4.	J80/22/36	1 x L80x6	M22	36	75	149,3
5.	J80/22/39	1 x L80x6	M22	39	75	177,6
6.	D80/18/24	2 x L80x6	M18	24	60	220,5
7.	J80/18/24	1 x L80x6	M18	24	60	112,2 (ś)
8.	J80/18/28	1 x L80x6	M18	28	60	121,5 (ś)
9.	J80/18/31	1 x L80x6	M18	31	60	119,1 (ś)
10.	J60/22/27	1 x L60x6	M22	27	75	105,6
11.	J60/22/29	1 x L60x6	M22	29	75	118,3
12.	D60/20/27	2 x L60x6	M20	27	66	196,3
13.	J60/20/27	1 x L60x6	M20	27	66	83,8
14.	J60/20/31	1 x L60x6	M20	31	66	130,9
15.	D60/18/24	2 x L60x6	M18	24	60	180,4
16.	J60/18/24	1 x L60x6	M18	24	60	93,0
17.	J60/18/28	1 x L60x6	M18	28	60	111,9 (ś)
18.	J60/18/31	1 x L60x6	M18	31	60	116,2 (ś)
19.	D50/12/16	2 x L50x5	M12	16	40	105,4 (ś)
20.	J50/12/16	1 x L50x5	M12	16	30	49,9 (ś)
21.	D50/16/22	2 x L50x5	M16	22	55	137,9
22.	J50/16/22	1 x L50x5	M16	22	35	83,2

Połączenia kątownika z blachą zaprojektowano tak, aby zniszczeniu uległ kątownik w osłabionym przekroju, a nie śruba. Aby wywołać zniszczenie w połączeniu, w którym mierzono przemieszczenie pomiędzy kątownikiem a blachą za pomocą ekstensometru (por. położenie punktów pomiarowych na rys. 2), zróżnicowano rozmiar luzu w otworach na śruby. W połączeniu, w którym kątownik miał ulec rozerwaniu otwór wykonano z luzem według wskazań normy PN-EN 1090-2 [6] dla danej średnicy śruby. Natomiast na drugim końcu, średnica otworu na śrubę była równa średnicy śruby (brak luzu). Wszystkie otwory, zarówno w kątownikach, jak i blachach były wiercone. W każdym styku śrubowym stosowano podkładki z obu stron styku (pod łbem śruby i pod nakrętką).

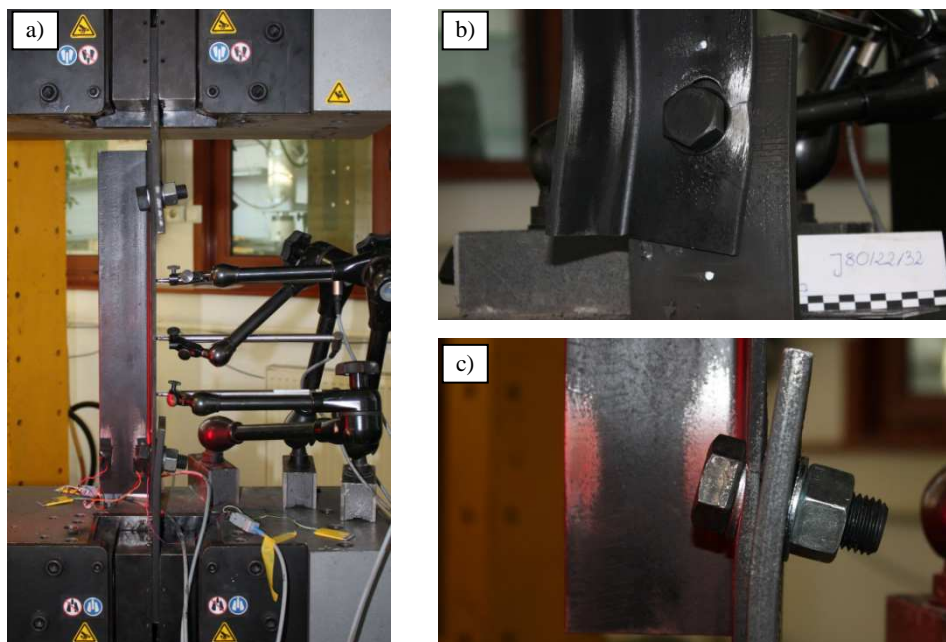
4. Przebieg badań i otrzymane rezultaty

Na wstępie zbadano parametry mechaniczne stali kątowników. Statyczna próba rozciągania wykazała średnią granicę plastyczności $f_y = 320 \text{ N/mm}^2$ oraz granicę wytrzymałości stali $f_u = 449 \text{ N/mm}^2$.

Badania elementów badawczych zostały wykonane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 1200kN-J1D (rys. 3a). Proces rozciągania sterowany był przemieszczeniem. Prędkość przyrostu przemieszczenia wynosiła $0,5 \text{ mm/min}$. Podczas badania rejestrowano powstającą siłę, przemieszczenie szcęk maszyny wytrzymałościowej oraz pojawiające się przemieszczenie pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi, zaznaczonymi na kątowniku i blasze węzłowej w obszarze badanego połączenia (rys. 2). Ten pomiar odbywał się za pomocą ekstensometru optycznego. Zarejestrowane w ten sposób przebiegi zależności obciążenie – przemieszczenie pokazano na rys. 4, dla kilku wybranych elementów badawczych.

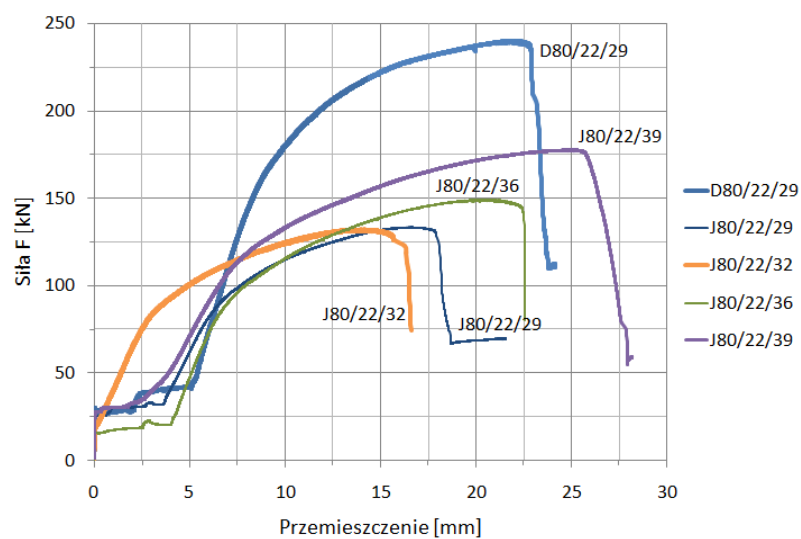
Dodatkowo podczas badań w jednym elemencie mierzono odkształcenia za pomocą foliowych tensometrów elektrooporowych, usytuowanych w trzech miejscach, w obszarze połączenia. W kilku elementach mierzono przy użyciu czujników przemieszczeń wygięcie kątownika spowodowane mimośrodem obciążenia.

Piętnaście elementów badawczych uległo zniszczeniu poprzez rozerwanie kątownika w miejscu osłabienia otworem ścianki przylgowej, w siedmiu zniszczenie polegało na ścięciu śruby. Zniszczenie poprzez rozerwanie osłabionego kątownika zachodziło przy znacznych deformacjach plastycznych, przewężeniu fragmentu ścianki przylgowej (w obszarze od otworu do zewnętrznego brzegu ramienia) i przy wywołanej tym owalizacji otworu na śrubę. Powstające pęknięcia inicjowane było od zewnętrznego brzegu ścianki (rys. 3b). Przy rozciąganiu pojedynczych kątowników zaobserwowano również wyraźną deformację giętą blach węzłowych (rys. 3c) i niewielkie ugięcie kątownika (strzałka ugięcia nie przekraczała $4,5 \text{ mm}$).



Rys. 3. Element badawczy J80/22/32; a) widok; b) sposób zniszczenia; c) deformacje blachy

Fig. 3. Specimen J80/22/32: a) a view; b) type of failure; c) deformation of gusset plate



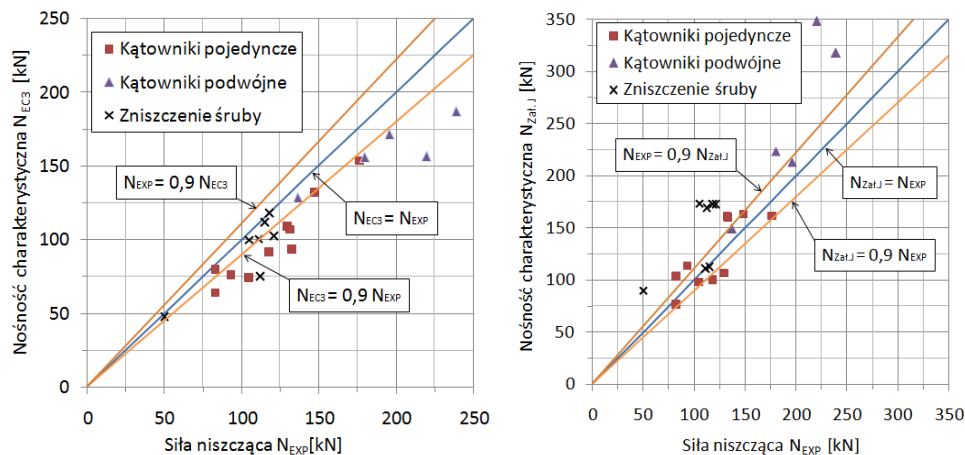
Rys. 4. Otrzymane z badań zależności siła-przemieszczenie wybranych elementów próbných

Fig. 4. Experimental force-displacement relationships for selected specimens

Jako nośność graniczną otrzymaną z badań N_{exp} przyjęto największą wartość siły zarejestrowanej podczas badań danego elementu. Wartości te zestawiono w tabeli 1. Symbol „(ś)” przy niektórych wynikach oznacza, że o nośności decydowała śruba, kątownik zaś nie uległ zniszczeniu.

Podczas badań stwierdzono wpływ położenia osi otworu względem brzegu ramienia kątownika e_2 na nośność graniczną N_{exp} . Nośność kątowników wzrasta (por. rys. 3) wraz ze wzrostem wartości e_2 , czego nie ujmuje zależność (2).

Porównanie pomiędzy nośnością graniczną z badań N_{exp} a charakterystycznymi wartościami nośności według zależności (1) N_{EC3} oraz według (2) - N_{ZalJ} (z uwzględnieniem granicy wytrzymałości stali otrzymanej z badań) pokazano na rys. 5. Wartość średnia proporcji N_{EC3}/N_{exp} wynosi 0,85, przy odchyleniu standardowym 0,1 (uwzględniono wszystkie wyniki z badań), proporcja zaś $N_{ZalJ}/N_{exp}=1,21$, przy odchyleniu standardowym 0,27.



Rys. 5. Porównanie nośności granicznej z badań N_{exp} z charakterystycznymi wartościami nośności według zależności (1) N_{EC3} oraz według (2) - N_{ZalJ}

Fig. 5. Comparison between test results N_{exp} and characteristic value of tension resistance according to (1) N_{EC3} and according to (2) - N_{ZalJ}

5. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki można stwierdzić, że nośność kątowników mocowanych jedną śrubą, w przypadku określania jej za pomocą wyrażenia (1), jest lekko niedoszacowana. Zależność (2) z kolei daje wyniki zawyżone. W szczególności wyrażenie (2) nie uwzględnia wpływu położenia otworu względem brzegu ramienia kątownika e_2 . W niektórych przypadkach może prowadzić to do znacznych i niebezpiecznych przeszacowań nośności elementów.

Literatura

- [1] ANSI/AISC 360-10 Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2010.
- [2] Chesson, E.Jr., Munse, W.H.: Riveted and bolted joints: Truss-type tensile connections, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 89, No. ST1, pp. 67-106, 1963.
- [3] Kulak G.L., Wu Y.: Shear lag in bolted angle tension members, Journal of Structural Engineering, 123(9), 1144–1152, 1997.
- [4] Munter H.L.N., Bourman L.P.: Onderzoek naar de bezwijksterkten van constructiedelen met 1 bout en met 2 bouten per verbinding, Rapport: 6-75-4, Stevin-Laboratorium, Technische Hogeschool Delft, 1975.
- [5] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie, Wydawnictwo Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1995.
- [6] PN-EN 1090-2 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych - Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych, PKN, Warszawa 2012.
- [7] PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-8: Projektowanie węzłów, PKN, Warszawa 2006.
- [8] PN-EN 50341-1 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1-Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne, PKN, W-wa, 2013.
- [9] Wu Y., Kulak G.L.: Shear lag in bolted single and double angle tension members. Structural Engineering Report No. 187, University of Alberta, 1993.
- [10] Yip A. S-M., Cheng J.J.R.: Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension, Structural Engineering Report No. 233, University of Alberta, 2000.

EXPERIMENTAL TESTS OF ANGLE TENSION MEMBERS CONNECTED BY ONE BOLT

Summary

In civil engineering structures, steel angle members are often used as tension elements. The most common form of joining such members is connecting them by only one leg, using one or more bolts. In these case, the eccentricity of the connection and net cross-section area in joined leg have a big influence on tension resistance. This paper reports on methodology and the results of experimental testing 22 single and double angle tension members connected by one bolt to the gusset plates. Three sizes of elements were used: L50x5, L60x6, L80x6. The bolts diameters fell with the range from M12 to M22. The main variable in specimens was the distance (in perpendicular direction to the tensile force) from the edge of connected leg to the center of fastener hole. The results allowed to countercheck different designing rules described in ruling codes. These study especially focuses on Eurocode 3 (PN-EN 1993-1-8) and PN-EN 50341-1.

Keywords: angle members, net area, shear lag effect, bolted connections

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.38