



Weryfikacja doświadczalna słupów oświetleniowych GFRP

Filip Broniewicz¹

STRESZCZENIE:

Celem artykułu jest porównanie nośności na zginanie kompozytowych słupów oświetleniowych GFRP otrzymanej za pomocą procedury normowej z wynikami badań na elementach rzeczywistych. W ramach pracy badawczej przebadano 19 kompozytowych słupów oświetleniowych i zweryfikowano ich nośność za pomocą obliczeń według normy PN-EN 40–3–3. Otrzymane wyniki różniły się znacząco. Obecne normowe zasady obliczania nośności słupów GFRP oparte na metodzie stanów granicznych wykazują wyższą nośność słupa, niż wynika to z badań. Badania na elementach wykazały, że podstawowym modelem zniszczenia słupa jest utrata stateczności miejscowej w sąsiedztwie otworu rewizyjnego słupa. Norma nie uwzględnia tego typu zniszczenia, odnosząc się do niego tylko częściowo i nie podając dokładnych procedur obliczania nośności słupa. Jednocześnie pozostawia użytkownikowi wybór pomiędzy weryfikacją nośności elementu za pomocą obliczeń lub za pomocą badań. Weryfikacja jedynie za pomocą obliczeń powoduje więc niebezpieczeństwo nieświadomego zawyżenia nośności słupa.

SŁOWA KLUCZOWE:

słupy oświetleniowe; GFRP; badania; nośność na zginanie

1. Wprowadzenie

Słupy kompozytowe są nową generacją słupów, które zyskują coraz większe znaczenie na rynku oświetleniowym. Słupy betonowe i metalowe wciąż stanowią zdecydowaną większość inwestycji, jednak są one podatne na negatywne wpływy warunków środowiska. Elementy kompozytowe charakteryzują się większą trwałością. Z tego powodu, a także potencjalnych korzyści ekonomicznych wynika szerokie zainteresowanie inwestorów słupami kompozytowymi.

Według badań przeprowadzonych przez Swedish Environmental Research Institute [1], który oceniał cykl życia słupów oświetleniowych złożonych z różnych materiałów, słupy kompozytowe wykazują się jednym z najmniejszych oddziaływań na środowisko, ustępując tylko słupom drewnianym. Natomiast zajmują one pierwsze miejsce w kategorii efektów toksycznych dla ludzi (są najmniej toksyczne). Ważne jest też wysokie bezpieczeństwo bierne elementu, pozwalające uniknąć nadmiernych zniszczeń pojazdu podczas zderzenia.

Słupy kompozytowe są nowoczesnym i niekonwencjonalnym elementem konstrukcyjnym i z tego powodu sposób obliczania ich nośności nie jest do końca ustalony. Anizotropowość materiału spowodowana metodą wytwarzania kompozytu żywicy polimerowej i włókien szklanych powoduje trudności z określeniem naprężeń. Różne charakterystyki wytrzymałościowe materiałów tworzących kompozyt, a także dowolność ułożenia ich względem siebie nie pozwalają na zastosowanie kryteriów wytrzymałościowych znanych z materiałów izotropowych [2]. Ponadto, problemem pozostaje ocena modeli zniszczenia, np. przez wyboczenie lub utratę stateczności miejscowej, które są zależne od kształtu i wymiarów konstrukcji.

¹ Politechnika Białostocka, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Wiejska 45A, 15–351 Białystok, e-mail: filipbron@gmail.com, orcid id: 0000-0003-4506-5521

Jednym z pierwszych kryteriów wytrzymałościowych szeroko stosowanych w projektowaniu polimerowych słupów kompozytowych jest kryterium Tsai'a-Wu [3]. Jest to kryterium empiryczne, uwzględniające zależności pomiędzy naprężeniami w wieloosiowych stanach naprężenia. Zakłada ono, że istnieje powierzchnia zniszczenia w przestrzeni naprężeń opisana w formie skróconej jako:

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

gdzie: F_i, F_{ij} – tensory wytrzymałości II i IV rzędu, σ_i – składowe stanu naprężenia.

Kryterium to pozwala wyznaczyć wszystkie potrzebne elementy tensorów wytrzymałości za pomocą prób jednoosiowego rozciągania i ściskania oraz próby ścinania. W związku z tym łatwo jest określić właściwości kompozytu, a zatem przewidzieć zachowanie elementu.

D. Polyzois i jego zespół, badając słupy GFRP pod obciążeniem poziomym przykładanym do końca słupa, ustalili, że wykazują one 3 modele zniszczenia [4]. Typowe modele zniszczenia to przekroczenie wytrzymałości w miejscu największych naprężeń ścinających i zniszczenie w miejscu największych naprężeń rozciągających. Taki model zniszczenia następował przy słupach z sześcioma i większą liczbą warstw. W tym przypadku wartość kryterium Tsai'a-Wu wynosiła 1, więc wynik eksperymentu zgadzał się z założeniami teoretycznymi.

W przypadku słupów o cieńszej ścianie (4-warstwowych) modelem zniszczenia dla cienkich słupów okazała się utrata stateczności miejscowej. Słupy te nie osiągały zakładanej nośności według kryterium Tsai'a-Wu, co wskazuje na to, że zniszczenie nie jest spowodowane wyczerpaniem nośności materiału, a niestatecznością miejscową elementu. Prowadzi to do obniżenia rzeczywistej nośności słupa i wymaga uwzględnienia tego modelu zniszczenia podczas projektowania słupów.

Na problemy z obliczaniem nośności słupa zwrócili uwagę także naukowcy z University of Sherbrooke [5], którzy prowadzili projekt badawczy mający na celu opracowanie nowej procedury, która miała zastąpić oficjalne standardy projektowania słupów kompozytowych obowiązujące w Kanadzie. Zauważyli oni, że dla słupów o kształcie stożkowym z wyciętymi otworami na drzwiczki rewizyjne podstawowym modelem zniszczenia słupa jest utrata stateczności miejscowej w pobliżu otworu, co nie jest przewidywane przez aktualne procedury obliczania nośności. Ich metoda opiera się na uzależnieniu nośności na zginanie słupa i maksymalnego ugięcia słupa od stosunku $(E \cdot I)/(L \cdot \rho)$, gdzie: E – moduł sprężystości podłużnej słupa, I – moment bezwładności przekroju słupa u podstawy, L – długość słupa, a ρ jest gęstością liniową włókien.

W związku z procesem wprowadzania na rynek takich elementów kompozytowych na Politechnice Białostockiej wykonano badania w celu wykazania zgodności wytwarzanych słupów z normami przedmiotowymi. Norma [6] wymaga, aby słupy GFRP bezpiecznie przenosiły obciążenia stałe i obciążenia wiatrem określone w [7]. Projekty słupów należy zweryfikować za pomocą badań wg normy [8] lub obliczeń wg [9]. W ramach pracy przeprowadzono badania eksperymentalne słupów oraz ich analizę obliczeniową przy wykorzystaniu obydwu norm, a następnie porównano otrzymane wyniki.

2. Przygotowanie badań

Badaniami objęto 19 słupów o długościach od 3 do 8 m. Miały one kształt ściętego stożka zwężającego się ku górze. Słupy wykonane były z kompozytu włókien szklanych typu E i żywicy epoksydowej. Każdy słup posiadał drzwiczki rewizyjne o wymiarach zależnych od wysokości słupa. Słupy opisano numerami wg schematu „x-y”, gdzie „x” to długość słupa w metrach, a „y” – numer egzemplarza.

Słupy składają się z warstw włókien szklanych ułożonych w matrycy z żywicy epoksydowej. Są to tkaniny szklane dwukierunkowe oraz maty szklane, w których krótkie cięte włókno jest ułożone w sposób losowy. Słupy składały się z 6–8 warstw w zależności od ich długości.

W związku z taką konstrukcją trzonu założono izotropowość materiału, co zostało potwierdzone badaniami właściwości mechanicznych próbek pobranych z trzonów słupów. Słupy były przymocowane do stanowiska badawczego za pomocą 4 śrub M20 i podparte w 2/3 swojej długości na podporze przesuwnej w celu wyeliminowania wpływu ciężaru własnego słupa (rys. 1).



Rys. 1. Widok słupa na stanowisku badawczym

Siły przykładane były za pomocą urządzenia naciągowego. Przyrząd do pomiaru zadawanej siły został umieszczony pomiędzy urządzeniem naciągowym a słupem. Siła przykładana była punktowo przez obejmę umieszczoną w odległości 0,5 m od wierzchołka słupa. Dokładność siłomierza wynosiła 0,02 kG, co równa się sile 0,19 N.

Jako przekroje krytyczne słupa, w których dokonywano pomiarów przemieszczeń trzonu, ustalono:

- dolną krawędź otworu rewizyjnego,
- górną krawędź otworu rewizyjnego,
- miejsce przyłączenia latarni.

W miejscach dolnej i górnej krawędzi otworu na drzwiczki rewizyjne umiejscowiono precyzyjne czujniki zegarowe przemieszczeń 0,01 mm firmy KAFER. W miejscu przyłączenia latarni pomiaru przemieszczenia trzonu słupa dokonywano dalmierzem laserowym Bosch GLM 40 o dokładności pomiarowej 0,5 mm.

Słup obciążany był 3-etapowo. W pierwszym etapie wykonano próbę użyteczności poprzez obciążenie słupa w stanie granicznym użyteczności siłą wywołującą moment charakterystyczny w podstawie słupa, a następnie słup odciążano. W drugim etapie wykonano próbę nośności. Słup obciążano aż do wartości obliczeniowego minimalnego obciążenia granicznego i rejestrowano ugięcie poziome oraz sprawdzano przekroje krytyczne na wypadek wystąpienia uszkodzeń.

Ostatnim etapem była próba niszcząca. Słup obciążano dalej aż do zniszczenia słupa i mierzono odkształcenie trwałe końca słupa. Zaobserwowanym modelem zniszczenia była utrata stateczności miejscowej nieuszkodzonych ścianek w sąsiedztwie otworu rewizyjnego w strefie ściskanej słupa.

3. Nośność słupa

3.1. Weryfikacja nośności za pomocą badań

Badaniom niszczącym poddano 19 słupów. Słupy pękały wskutek lokalnej utraty stateczności ścianki w pobliżu otworu rewizyjnego. W tabeli 1 podano siły, które wywołały zniszczenie słupa. Podczas zginania słupów otwór rewizyjny znajdował się po stronie ściskanej przekroju.

Tabela 1

Siła przyłożona do słupa wywołująca jego zniszczenie

Nr słupa	Siła niszcząca F_B [N]
3-1	508
3-2	680
4-2	450
5-1	380
5-2	360
5-3	293
5-4	400
5-6	430
6-1	670
6-3	470

Nr słupa	Siła niszcząca F_B [N]
7-1	460
7-2	460
7-3	385
7-6	478
8-1	344
8-3	342
8-4	345
8-5	380
8-6	460

Na rysunku 2 można zauważyć rozerwanie materiału po obu stronach otworu. Wszystkie badane słupy ulegały zniszczeniu w podobny sposób.



Rys. 2. Widok słupa w miejscu otworu rewizyjnego po badaniu niszczącym

3.2. Weryfikacja nośności za pomocą obliczeń

Po wykonaniu badań elementów w skali naturalnej wycięto próbki materiału z nieuszkodzonych fragmentów słupów. Wykonano z nich kształtki użyte do przeprowadzenia prób rozciągania, zginania i ścinania. Po oznaczeniu właściwości mechanicznych słupa otrzymane wartości użyto do weryfikacji obliczeniowej projektu słupa za pomocą normy [9] na wymagane obciążenia. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli 2. Nośność na zginanie policzono dla 3 krytycznych przekrojów słupa, przy zginaniu elementu względem osi y-y przechodzącej przez środek otworu rewizyjnego oraz względem osi z-z.

Tabela 2

Nośność na zginanie słupów według [9]

Długość słupa [m]	Nośność przekroju na zginanie M_U [N·m]					
	Górny brzeg otworu rewizyjnego		Dolny brzeg otworu rewizyjnego		Podstawa słupa	
	z-z	y-y	z-z	y-y	z-z	y-y
3	3552	5168	3834	5501	11320	11320
4	3849	5498	3999	5684	11170	11170
5	4061	5772	4221	5972	11140	11140
6	5927	8272	6849	9558	18010	18010
7	5803	8097	6160	8479	16950	16950
8	5741	8012	6066	8349	16480	16480

Do porównania wykorzystano najmniejsze obliczone nośności, czyli te względem osi z-z elementu, w miejscu górnego brzegu otworu rewizyjnego.

4. Analiza porównawcza

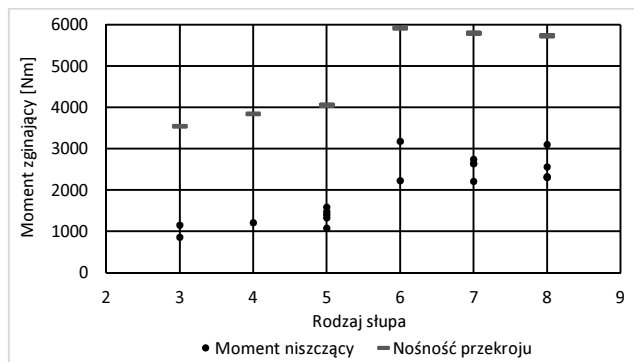
Słupy podczas badania nie osiągały nośności przewidzianej przez procedurę normową. W tabeli 3 pokazano porównanie wartości momentów zginających powodujących zniszczenie do ich nośności obliczeniowych określonych na podstawie normy przedmiotowej. Na rysunku 3 przedstawiono to porównanie w formie graficznej.

Tabela 3

Porównanie wartości nośności doświadczalnych z nośnościami obliczeniowymi

Nr słupa	Moment niszczący M_B [Nm]	Nośność przekroju wg [9] M_U [Nm]	M_B/M_U [%]
3-1	863,6	3552	24%
3-2	1156	3552	33%
4-2	1215	3849	32%
5-1	1406	4061	35%
5-2	1332	4061	33%
5-3	1084	4061	27%
5-4	1480	4061	36%
5-6	1591	4061	39%
6-1	3182,5	5927	54%

Nr słupa	Moment niszczący M_B [Nm]	Nośność przekroju wg [9] M_U [Nm]	M_B/M_U [%]
6-3	2232,5	5927	38%
7-1	2645	5803	46%
7-2	2645	5803	46%
7-3	2213,75	5803	38%
7-6	2748,5	5803	47%
8-1	2322	5741	40%
8-3	2308,5	5741	40%
8-4	2328,75	5741	41%
8-5	2565	5741	45%
8-6	3105	5741	54%

**Rys. 3.** Porównanie wartości momentów zginających niszczących badane słupy GFRP do ich nośności obliczeniowych

Na podstawie porównania można stwierdzić, że nośność słupów na zginanie otrzymana z badań eksperymentalnych ma wartość od 0,24 do 0,54 wartości nośności na zginanie obliczonej wg normy [9], a więc jest w wielu przypadkach trzykrotnie niższa. Norma ta nie uwzględnia zniszczenia słupa poprzez wyobczenie miejscowe w miejscu otworu. Możliwość wystąpienia takiej formy zniszczenia słupów jest wymieniona w normie [6], jednak bez przedstawienia konkretnych zaleceń, które pozwoliłyby na obliczenie siły niszczącej słup.

5. Wnioski

W ramach pracy badawczej przeprowadzono badania 19 kompozytowych słupów oświetleniowych (GFRP) w skali naturalnej o wysokościach 3, 4, 5, 6, 7 i 8 m. Otrzymane wyniki doświadczalne nośności na zginanie w chwili zniszczenia słupów porównano z wartościami obliczeniowymi otrzymanymi według procedury obliczeniowej zawartej w normie przedmiotowej [9].

Z otrzymanych danych wynika, że norma [9] nie zapewnia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa tego rodzaju słupów, dokonując prawie 3-krotnego przeszacowania ich nośności na zginanie w przypadku słupów o wysokości 3 do 5 m oraz 2-krotnego przeszacowania nośności w przypadku słupów o wysokości 6 do 8 m.

W świetle zaleceń normy [6] stanowiących, że sprawdzający projekt słupa nie jest zobligowany do wykonania badań na elementach w skali naturalnej, może to doprowadzić do nieświadomego zawyżenia nośności słupa.

Literatura

- [1] Erlandsson M., Comparison of the environmental impacts from utility poles of different materials, Swedish Environmental Research Institute, 2012.
- [2] German J., Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996.
- [3] Tsai S.W., Wu E.M., A general theory of strength for anisotropic materials, Journal of Composite Materials 1971, 58–80.
- [4] Polyzois D. i in., Performance of fiber-reinforced plastic tapered poles under lateral loading, Journal of Composite Materials 1999, 33, 941–960.
- [5] Metiche S., Masmoudi R., Analysis and design of full-scale GFRP composites poles, American Society for Composites: 26th Technical Conference Proceedings, DEStech Publications, 2011.
- [6] PN-EN 40-7: 2008. Słupy oświetleniowe – Część 4: Wymagania dotyczące słupów oświetleniowych z betonu zbrojonego i sprężonego.
- [7] PN-EN 40-3-1:2013-06. Słupy oświetleniowe – Część 3-1: Projektowanie i weryfikacja – Obciążenia charakterystyczne.
- [8] PN-EN 40-3-2:2013-06. Słupy oświetleniowe – Część 3-2: Projektowanie i weryfikacja – Weryfikacja za pomocą badań.
- [9] PN-EN 40-3-3:2013. Słupy oświetleniowe – Część 3-3: Projektowanie i weryfikacja – Weryfikacja za pomocą obliczeń.

Experimental verification of GFRP lighting poles

ABSTRACT:

The purpose of this work is examination of GFRP lighting pole's bending strength obtained with national standard's procedure in comparison with the results of full-scale poles' experimental tests. 19 GFRP poles were submitted to bending tests, as well as their bending strength, according to PN-EN 40-3-3 standard, was calculated. The obtained results differed greatly.

Current procedure of bending strength calculation, based on limit states theory, exhibit higher bending capacity than the capacity obtained from full-scale tests. Experimental study reveals that the basic failure mode of GFRP pole is local buckling in the vicinity of inspection hole. The Eurocode standard does not attach enough importance to this type of failure. It refers to this failure mode only partially, without providing accurate procedure of calculating pole's bending strength. Moreover, it leaves the choice between experimental and calculation verification solely to the designer. Therefore, verification only by calculation poses a risk of inadvertent overestimation of pole's bending strength.

KEYWORDS:

lighting poles; GFRP; tests; bending strength