

Literatura

- [1] Cichocki K., Ruchwa M.: Robustness oriented analysis of structures under extreme loads, Proceedings of 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics – CMM-2011, 9 – 12 May 2011, Warsaw, Poland, 155 – 156.
- [2] Cichocki K., Ruchwa M.: Propagation of damage in structures under blast load, Proceedings of 57th Annual Conference on Scientific Problems of Civil Engineering, Poland, 18-22 September 2011, Krynica-Rzeszów, Poland, 98 – 99.
- [3] Gołaszewski J., Kostrzanowska A.: Właściwości reologiczne a stopień samoodpowietrzenia mieszanki samozagęszczalnej betonu wysokowartościowego, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 2, no. 3, 2011, 275 – 279.
- [4] Januszewski M.: Long-term durability and microstructural comparison of three reinforced concrete military structures, Proceedings of Concrete in Aggressive Aqueous Environments – Performance – Testing and Modelling, International RILEM TC 211-PAE Final Conference, Toulouse, France, 3-5 June, 2009, 485 – 492.
- [5] Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T.: Betony ultrawysokowartościowe własności technologie zastosowania, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, Poland, 2008.
- [6] Katzer J.: Impact Resistance of Sustainable SFRCC Road Pavement, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2012, vol. 7, no. 3, 198 – 203.
- [7] Katzer J.: Median diameter as a grading characteristic for fine aggregate cement composite designing, *Construction and Building Materials*, Vol. 35, 2012, 884 – 887.
- [8] Katzer J., Domski J.: Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, 2012, 243 – 248.
- [9] Katzer J., Kobaka J.: Combined Non-Destructive testing Approach to waste Fine Aggregate Cement Composites, *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol. 16, No. 4, 2009, 277 – 284.
- [10] Kaszyński J.: Ultradźwiękowe badania betonu z uwzględnieniem strefy zbrojenia i zarysowania, *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej* nr 575, Szczecin, Poland, 2003.
- [11] Łapko A., Grygo R.: Long Term Deformations of Recycled Aggregate Concrete (RAC) Beams Made of Recycled Concrete, *Modern Buildings Materials Structures and Techniques*, Proceedings of The 10th International Conference, 19-21 May 2010, Vilnius, Lithuania, 709 – 712.
- [12] Malhorta V. M., Mehta P. K.: High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete, *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.*, Ottawa, Canada, 2005.
- [13] Piecuch I., Piecuch T.: Environmental Education and Its Social Effects, *Annual Set – The Environment Protection*, vol. 15, part 1, 2013, 192 – 212.
- [14] Ponikiewski T., Cygan G.: Właściwości mieszanki i betonów samozagęszczalnych modyfikowanych włóknami stalowymi, *Materiały Budowlane*, 10/2011, 46 – 48.
- [15] Ponikiewski T., Cygan G.: Wybrane właściwości samozagęszczających się fibrobetonów z włóknami stalowymi, *Cement – Wapno – Beton*, 4/2011.

dr inż. Monika Matuszkiewicz*

Analiza parametryczna wpływu osiadania fundamentu trzonu masztu na stan sił i przemieszczeń konstrukcji masztu

Parametric analysis of the influence of the mast shaft foundation settlement on the forces and displacements of the mast structure

Maszty z odciągami, jako konstrukcje wstępnie sprężone wskutek odpowiedniego napięcia odciągów, są bardzo wrażliwe na przemieszczenia podpór, które mogą istotnie wpływać na zmniejszenie sił napinających odciągi, a tym samym powodować niekorzystne zmiany stanu wstępnego sprężenia całej konstrukcji masztu. Szczególnie niekorzystna może być sytuacja, w której różne jest osiadanie centralnego fundamentu masztu i fundamentów odciągów. Może tak się zdarzyć, gdy projektowane są masywne, skrzyniowe fundamenty pod odciągi, których sam ciężar niweluje siły wyrywające od zakotwionych lin. W takich przypadkach, zgodnie z zaleceniami PN-EN 1993-3-1. Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji*

stalowych. Część 3-1: *Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty*, oddziaływania spowodowane osiadaniem fundamentów powinny być uwzględnione w projektowaniu masztów. Istotne znaczenie ma rodzaj gruntu, na którym będzie posadowiona konstrukcja. W gruntach niespoistych proces osiadania pod ciężarem własnym konstrukcji przebiega praktycznie w czasie budowy i z jej zakończeniem osiąga wartość końcową. Wyregulowanie zatem przyjętych na etapie projektowania sił wstępnego napięcia odciągów następuje już po tym procesie. Inaczej jest w gruntach spoistych. Osiadanie fundamentów może przebiegać bardzo wolno, a pełną konsolidację gruntu osiąga się nawet po kilkunastu latach. Możliwa jest więc sytuacja, że założone na etapie projektowania siły wstępnego napięcia odciągów masztu po pewnym czasie od zakończenia budowy będą nieaktualne. Spadek sił

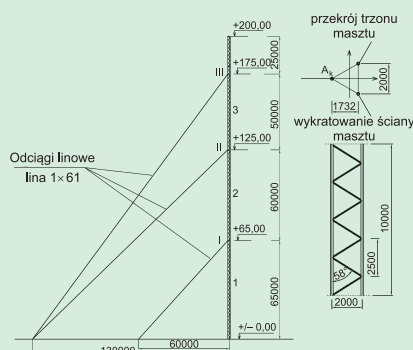
w odciągach jest jednoznaczny ze zmniejszeniem sztywności podpór sprężystych trzonu masztu, a co za tym idzie z większymi odkształceniami konstrukcji poddanej obciążeniom środowiskowym. W normie PN-EN 1993-3-1 nie ma podanych granicznych wartości przemieszczeń trzonu masztu, zależą one od konkretnego przeznaczenia konstrukcji i takie wytyczne powinien określić inwestor. W wypadku jednak gdy maszt ma być wyposażony w aparaturę wrażliwą na przemieszczenia, należy mieć na uwadze możliwe zmniejszenie sztywności konstrukcji posadowionej na gruntach, w których nie zakończył się proces konsolidacji.

Opis analizowanej konstrukcji masztu

Obliczenia przeprowadzono na przykładzie kratowego masztu wysokości 200 m z odciągami (rysunek 1).

* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Konstrukcji Metalowych

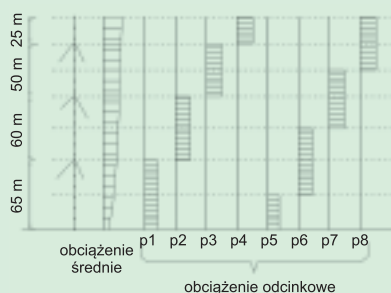
Jego trzon stanowi trójściana kratownica przestrzenna o rozstawie krawężników 2,0 m. Odciąg są zamocowane na poziomach 65,0 m, 125,0 m i 175,0 m. Zaprojektowano je z lin średnicy 32 mm i konstrukcji 1 x 61. Minimalna siła zrywająca linę wynosi 823,0 kN. Trzon masztu, podzielony na 10-m segmenty, zaprojektowano z rur $\varnothing 168,3/12,5$ mm (krawężniki) i $\varnothing 76,1/4,0$ mm (skratowanie). W obliczeniach założono dwie różne wartości sił wstępnego napięcia odciągów: $S_0 = 75$ kN oraz $S_0 = 82$ kN – jednakowo dla wszystkich odciągów (zgodnie z PN-EN 1993-3-1 siły wstępnego napięcia nie powinny przekraczać 10% wartości siły zrywającej linę). Analizowano dwa stany obciążenia konstrukcji – stan wstępnego sprężenia, w którym maszt był obciążony ciężarem własnym oraz stan dodatkowego obciążenia konstrukcji wiatrem. Maszt zlokalizowano w 2. strefie obciążenia wiatrem zgodnie z PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1: *Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*, na terenie kategorii II. Bazowa wartość ciśnienia prędkości wiatru w przypadku tej strefy wynosi $0,42$ kN/m². Konstrukcja została zakwalifikowana do 2. klasy niezawodności, stąd przyjęto wartości współczynników częściowych równe 1,1 dla obciążeń stałych i 1,4 dla obciążenia wiatrem.



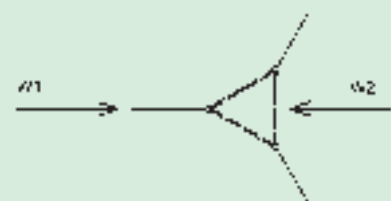
Rys. 1. Przyjęta geometria masztu

Schematy obciążenia wiatrem masztu ustalono zgodnie z PN-EN 1993-3-1 (rysunek 2). Obciążenie wiatrem masztu obejmuje: obciążenie średnie działające na całej wysokości konstrukcji oraz tzw. obciążenia odcinkowe działające tylko na pewne fragmenty masztu. Przeprowadzono obliczenia dla dwóch najbardziej niekorzystnych kierunków obciążenia wiatrem

(rysunek 3): W1, dla którego wartości sił w odciągach są największe oraz W2, dla którego konstrukcja ma najmniejszą sztywność.



Rys. 2. Schematy obciążenia wiatrem masztu



Rys. 3. Kierunki obciążenia wiatrem masztu

Analiza statyczna

Obliczenia statyczne wykonano, wykorzystując program Mast, opisany w [1]. Zastosowano globalną analizę sprężystą wg teorii II rzędu, z uwzględnieniem nieliniowych właściwości odciągów. W obliczeniach kratowy trzon masztu został zastąpiony pełnościenym prętem o odpowiednich charakterystykach geometryczno-wytrzymałościowych, z uwzględnieniem podatności na ściskanie, zginanie, ścinanie i skręcanie. W stanie wstępnego sprężenia (dla wartości sił wstępnego napięcia odciągów równych 75 i 82 kN) i w stanie dodatkowego obciążenia wiatrem konstrukcji obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem następujących wartości osiadania fundamentu

Tabela 1. Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu w stanie wstępnego sprężenia konstrukcji: a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN

Osiadanie fundamentu trzonu masztu [cm]	Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu					
	1		2		3	
	a	b	a	b	a	b
0	-1012,0	-1060,9	-688,3	-720,7	-373,7	-392,0
1	-990,4	-1037,8	-680,3	-711,8	-369,5	-387,3
2	-969,6	-1015,5	-672,5	-703,1	-365,4	-382,7
3	-949,8	-993,9	-665,0	-694,7	-361,5	-378,3
5	-913,7	-953,8	-650,7	-678,5	-353,9	-369,7
10	-845,4	-875,2	-618,9	-642,2	-337,0	-350,3

centralnego masztu: $w = 0$ cm (brak osiadań), $w = 1$ cm, $w = 2$ cm, $w = 3$ cm, $w = 5$ cm i $w = 10$ cm. W stanie obciążenia wiatrem konstrukcji siły wewnętrzne w elementach masztu i przemieszczenia obliczono zgodnie z procedurą opisaną w PN-EN 1993-3-1. Procedura jest dosyć skomplikowana (por. np. [2]).

Wyniki analizy

W tabeli 1 przedstawiono maksymalne wartości sił podłużnych w przęsłach trzonu masztu w stanie wstępnego sprężenia konstrukcji, w tabeli 2 – maksymalne wartości sił w odciągach. Dla stanu obciążenia konstrukcji wiatrem – w tabelach 3, 4 i 5 podano obliczone wartości sił wewnętrznych w trzonie masztu dla kierunku obciążenia wiatrem W2, tj. kierunku, dla którego konstrukcja ma najmniejszą sztywność. Maksymalne wartości sił w odciągach zestawiono w tabelach 6 i 7 – odpowiednio dla kierunku obciążenia wiatrem W1 i W2. Odształcenia trzonu masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem pokazano na rysunku 4 – osobno dla przyjętych wartości sił wstępnego napięcia odciągów $S_0 = 75$ kN i $S_0 = 82$ kN.

Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy parametrycznej wpływu osiadania fundamentu centralnego masztu na siły i przemieszczenia konstrukcji masztu można zauważyć, że już stosunkowo nieduże wartości osiadania powodują znaczące zmiany w układzie sił wewnętrznych i geometrii konstrukcji. Przede wszystkim następuje zmniejszenie założonych sił wstępnego napięcia odciągów, co wpływa na zmniejszenie sztywności podpór sprężystych

Tabela 2. Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu w stanie wstępnego sprężenia konstrukcji: a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN

Osiedlenie fundamentu trzonu masztu [cm]	Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu					
	I		II		III	
	a	b	a	b	a	b
0	76,2	83,6	77,7	84,5	79,7	87,3
1	70,1	77,3	75,9	82,5	77,9	85,3
2	64,3	71,2	74,1	80,5	76,2	83,4
3	58,8	65,3	72,4	78,6	74,6	81,6
5	48,9	54,5	69,2	75,0	71,5	78,0
10	32,5	35,4	62,1	66,9	64,5	70,0

Tabela 3. Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem (kierunek wiatru W2): a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN

Osiedlenie fundamentu trzonu masztu [cm]	Wartości sił podłużnych [kN] w przęsłach trzonu masztu					
	1		2		3	
	a	b	a	b	a	b
0	-1121,5	-1149,0	-787,2	-800,6	-455,9	-456,5
1	-1110,9	-1136,0	-784,9	-796,6	-456,8	-456,2
2	-1101,3	-1125,3	-782,6	-792,9	-457,6	-455,9
3	-1092,8	-1116,3	-780,7	-789,4	-458,7	-455,8
5	-1076,8	-1100,4	-777,8	-784,3	-461,3	-456,9
10	-1062,7	-1067,6	-779,5	-776,9	-472,7	-461,9

Tabela 4. Wartości momentów podporowych [kNm] w trzonie masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem (kierunek wiatru W2): a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN

Osiedlenie fundamentu trzonu masztu [cm]	Wartości momentów podporowych [kNm] w trzonie masztu					
	I		II		III	
	a	b	a	b	a	b
0	514,7	516,9	788,6	722,1	528,4	518,3
1	496,7	504,6	809,9	739,8	528,7	520,3
2	477,7	487,1	828,5	757,1	530,5	522,2
3	459,5	467,7	848,3	772,1	532,5	526,2
5	426,9	430,4	892,0	814,6	537,3	528,2
10	349,8	350,7	1027,6	927,6	549,7	540,5

Tabela 5. Wartości momentów przęsłowych [kNm] w trzonie masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem (kierunek wiatru W2): a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN

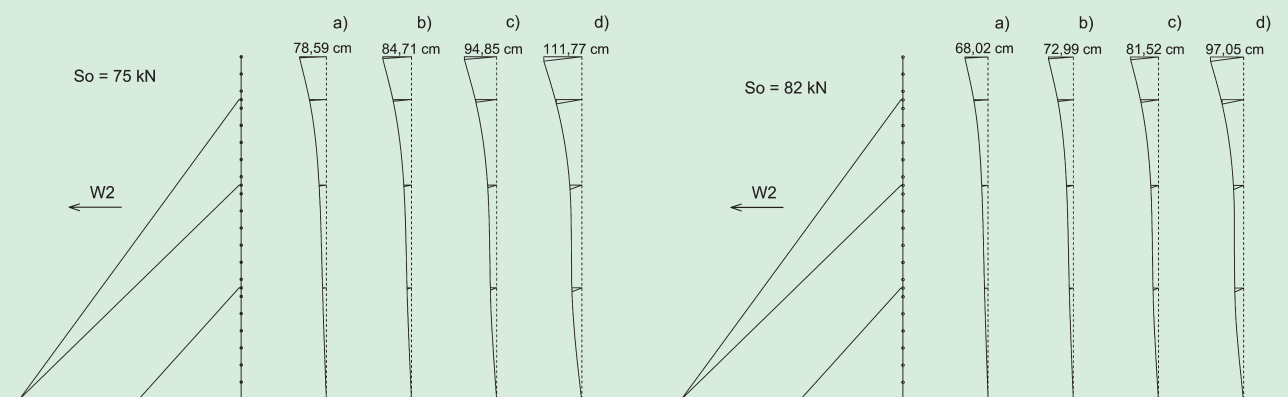
Osiedlenie fundamentu trzonu masztu [cm]	Wartości momentów przęsłowych [kNm] w trzonie masztu					
	1		2		3	
	a	b	a	b	a	b
0	-630,7	-628,9	-579,9	-534,7	634,6	575,3
1	-641,5	-633,0	-598,6	-549,2	654,4	591,1
2	-655,2	-643,0	-616,9	-565,0	671,6	607,1
3	-670,1	-656,9	-636,4	-580,4	689,1	619,5
5	-672,5	-688,5	-676,8	-620,2	727,1	658,9
10	-782,8	-766,0	-791,1	-725,0	830,9	754,5

trzonu masztu. Można przy tym zauważyć, że im niższy poziom zamocowania odciągów, tym bardziej znaczące są te spadki. Przykładowo, obliczone dla stanu wstępnego sprężenia konstrukcji maksymalne wartości sił w odciągach

na poziomie najniższym dla osiadania $w = 2$ cm spadły o ok. 15% w stosunku do obliczeń bez osiadania (na poziomie najwyższym – o ok. 4,5%), dla $w = 5$ cm odnotowano spadek sił ok. 35% (na poziomie najwyższym po-

nad 10%), a dla $w = 10$ cm – ok. 57% (na poziomie najwyższym 20%). Procentowe wartości spadków sił w odciągach dla sił wstępnego napięcia odciągów $S_0 = 75$ kN i $S_0 = 82$ kN były bardzo zbliżone.

Przy dodatkowym obciążeniu wiatrem konstrukcji uwzględnienie osiadania fundamentu trzonu masztu ma wpływ na wzrost przede wszystkim momentów zginających w przęsłach trzonu masztu. Przykładowo, dla wartości osiadania fundamentu $w = 5$ cm i przyjętych wartości wstępnego napięcia odciągów $S_0 = 75$ kN wartości momentów zginających, w porównaniu z wartościami obliczonymi dla konstrukcji bez uwzględnienia osiadania, wzrosły o ponad 6% (1 przęsło), ponad 16% (2 przęsło) i ok. 15% (3 przęsło). W przypadku zwiększonych wartości sił wstępnego napięcia odciągów $S_0 = 82$ kN – w przęsłach występują mniejsze wartości momentów zginających niż poprzednio – ale wzrost procentowy w przypadku przęsła pierwszego jest bardziej znaczący (dla $w = 5$ cm – ponad 9%). Osiedlenie fundamentu ma mniejszy wpływ na spadek maksymalnych sił w odciągach w sytuacji, gdy konstrukcja poddana jest działaniu wiatru (dotyczy to oczywiście odciągów po stronie nawietrznej – niezależnie od kierunku obciążenia wiatrem W1 i W2 – spadki kilkuprocentowe). Bardziej niebezpieczne są za to spadki sił w odciągach najniższych po stronie zawietrznej. Największe zanotowano w przypadku kierunku obciążenia wiatrem W2. Przykładowo, dla $S_0 = 75$ kN i $w = 2$ cm – spadek 28%, dla $w = 5$ cm – spadek 57%, a dla $w = 10$ cm – nawet ponad 70%. W przypadku stanu obciążenia konstrukcji wiatrem zauważono także, że ze wzrostem osiadania fundamentu centralnego masztu następuje spadek wartości momentów podporowych na I poziomie zamocowania odciągów, natomiast na poziomie II i III – wzrost. Zaobserwowane zjawiska można wytłumaczyć w ten sposób, że pod wpływem obciążenia wiatrem maszt osiągnie pewną sztywność, choć ze względu na spadek sił wstępnego napięcia w odciągach po stronie zawietrznej konstrukcja będzie bardziej wychylona od pionu, niż by to miało miejsce w przypadku nieuwzględnienia osiadania fundamentu. Zwiększenie wartości sił wstępnego napięcia od-



Rys. 4. Odształcenia trzonu masztu w stanie obciążenia wiatrem konstrukcji z uwzględnieniem osiadania fundamentu centralnego: a) $w = 0$ cm, b) $w = 2$ cm, c) $w = 5$ cm, d) $w = 10$ cm (przy wstępnym sprężeniu odciągów siłami 75 i 82 kN)

Tabela 6. Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem (kierunek wiatru W1): a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN (N – odciąg nawietrzny, Z – odciąg zawietrzny)

Osiadanie fundamentu trzonu masztu [cm]	Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu											
	I				II				III			
	a		b		a		b		a		b	
	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
0	189,0	71,0	193,6	79,9	187,5	77,8	192,5	83,7	236,8	83,0	241,4	88,8
1	185,7	63,9	189,7	72,4	186,4	76,2	191,2	81,9	236,0	81,7	240,3	87,3
2	182,1	57,2	186,3	65,2	185,4	74,7	189,5	80,1	234,8	80,5	239,0	85,9
3	180,3	51,4	182,3	58,4	184,5	73,2	188,4	78,4	234,0	79,2	237,9	84,5
5	175,8	42,3	178,5	47,3	182,9	70,5	186,5	75,3	232,1	77,0	235,7	81,8
10	168,2	31,3	169,7	33,1	180,1	64,5	183,0	68,3	227,9	71,8	231,2	75,9

Tabela 7. Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu w stanie obciążenia konstrukcji wiatrem (kierunek wiatru W2): a – $S_0 = 75$ kN, b – $S_0 = 82$ kN (N – odciąg nawietrzny, Z – odciąg zawietrzny)

Osiadanie fundamentu trzonu masztu [cm]	Maksymalne wartości sił [kN] w odciągach masztu											
	I				II				III			
	a		b		a		b		a		b	
	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
0	139,1	73,1	140,1	84,3	130,1	64,9	135,3	74,9	166,5	49,1	168,6	68,0
1	139,1	62,4	138,3	74,6	129,0	62,4	134,0	72,2	166,4	52,1	168,1	64,1
2	139,8	52,4	138,0	64,1	128,2	59,7	132,8	69,5	165,9	50,4	167,6	60,9
3	140,5	43,9	138,5	53,8	127,2	56,9	132,0	66,7	165,6	48,0	167,1	58,3
5	141,5	32,1	139,6	38,3	125,6	51,6	130,2	60,9	165,0	44,5	166,5	57,9
10	142,5	20,1	140,8	22,2	121,8	40,8	126,6	47,4	164,7	46,5	164,8	50,3

ciągów w analizowanej konstrukcji o niecałe 10% powoduje zwiększenie sztywności całej konstrukcji i nawet przy znacznym osiadaniu fundamentu istotnie redukuje odształcenia trzonu masztu (np. dla $w = 5$ cm redukcja poziomych przemieszczeń wierzchołka masztu wyniosła 13,7%, a przy $w = 10$ cm aż 18,5%).

Przedstawione wyniki dotyczą konkretnej konstrukcji masztu, a osiadania fundamentu centralnego masztu zostały z góry założone. Należy jednak zaznaczyć, że rzeczywiste osiadanie fundamentu trzonu masztu wynoszące 3 ÷ 5 cm jest w dłuższym czasie realne i szczególnie może dotyczyć masztów posadowionych na

nieskonsolidowanych gruntach sponistych, typu ily lub gliny, o dużym stopniu wilgotności.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy parametrycznej wpływu osiadania fundamentu centralnego masztu na stan sił i przemieszczeń konstrukcji masztowej. Parametrami zmiennymi były pionowe przemieszczenia fundamentu trzonu masztu oraz siły wstępne napięcia odciągów masztu. Obliczenia zostały przeprowadzone na przykładzie konkretnego masztu, zarówno w stanie wstępnego sprężenia, jak i dodatkowe obciążenia konstrukcji wiatrem. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano uwagi i wnioski, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce projektowej.

Słowa kluczowe: maszt z odciągami, kratowy trzon masztu, osiadanie fundamentu.

Abstract

This paper presents the results of a parametric analysis of the influence of the central mast foundation settlements on forces and displacements of the structure. Variable parameters were: vertical displacement of the mast shaft foundation and initial guy forces. Calculations were made on the selected example of the mast structure for the pre-stress condition and wind-load condition. On the basis of obtained results some remarks and conclusions, that can be applied in design practice, were drawn.

Literatura

- [1] Pałkowski Sz.: Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania. PWN, Warszawa 2009.
- [2] Matuszkiewicz M.: Obliczanie kratowych masztów z odciągami wg PN-EN 1993-3-1. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/2010, str. 194 – 199.