

Określenie maksymalnych składowych stycznych naprężenia na pobocznicy pała podczas badania statycznego

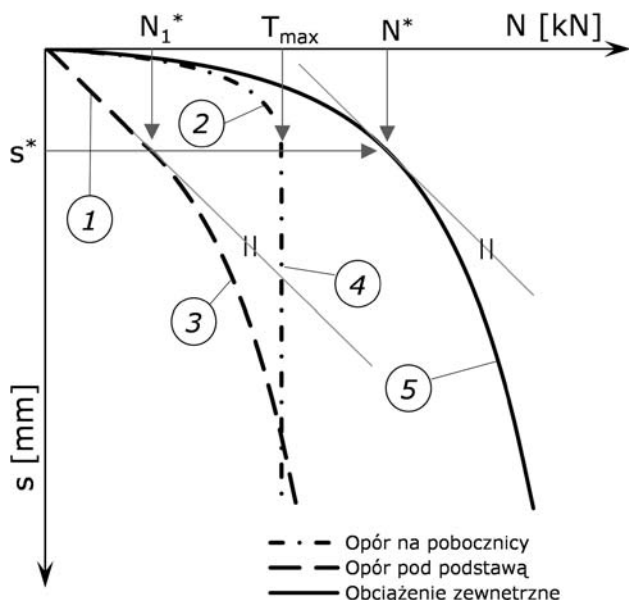
Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr inż. Krzysztof Żarkiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Próbne obciążenia statyczne są uważane za najbardziej pewną metodę sprawdzenia nośności pała. Wynikiem badania statycznego jest zależność osiadania głowicy pała od przyłożonego obciążenia zewnętrznego. Ze względu na ograniczone możliwości obciążania, pale są obciążane do maksymalnej wartości odpowiadającej 150% projektowej nośności. Wówczas otrzymuje się zależność $Q-S$ w ograniczonym zakresie. Problemem pozostaje uzyskanie krzywej $Q-S$ w pełnym zakresie obciążenia. Można to uzyskać np. poprzez zastosowanie aproksymacji Meyera-Kowalowa [3]. Powstaje pytanie: czy analiza statystyczna oparta na próbnym obciążeniu w ograniczonym zakresie pozwala na wyznaczenie całej krzywej $Q-S$ oraz czy oprócz informacji o nośności granicznej pała, można określić również mobilizację składowych stycznych naprężenia na pobocznicy? W artykule przedstawiono propozycję wyznaczenia maksymalnych składowych stycznych naprężenia na pobocznicy pała oraz charakteru mobilizacji tarcia o pobocznicy i oporu pod podstawą pała.

OPIS MATEMATYCZNY

Siła przyłożona w głowicy pała jest przekazywana do podłoża gruntowego poprzez tarcie na pobocznicy i opór pod podstawą pała. Zakładając, że w początkowym zakresie obciążania podstawa pała osiada według zależności określonej przez osiadanie płyty przyłożonej do powierzchni gruntu, tarcie na pobocznicy będzie różnicą obciążenia zewnętrznego i oporu



Rys. 1. Rozkład obciążenia zewnętrznego na tarcie o pobocznicy i opór pod podstawą pała

1 – opór podstawy pała według wzoru (1), 2 – tarcie na pobocznicy według wzoru (3), 3 – opór pod podstawą według wzoru (5), 4 – tarcie na pobocznicy według wzoru (4), 5 – obciążenie zewnętrzne według wzoru (2)

pod podstawą pała [5]. W dalszym etapie, po zmobilizowaniu maksymalnego tarcia na pobocznicy pała, założono, że tarcie to pozostaje na niezmiennym poziomie, a opór pod podstawą jest równy różnicy obciążenia zewnętrznego i maksymalnego tarcia na pobocznicy. Maksymalne tarcie na pobocznicy mobilizowane jest przy osiadanym równym $s = s^*$.

Wykres zależności osiadania od przyłożonego obciążenia $s = f(N)$, $s = f(N_1)$, i $s = f(T)$ podzielono na dwie części. Pierwsza w zakresie osiadań: $0 < s \leq s^*$ i druga w zakresie osiadań $s^* < s < \infty$.

Osiadanie podstawy pała przy założeniu równych osiadań podstawy i głowicy pała określone jest równaniem [5]:

$$s(N_1) = \frac{4N_1}{\pi DE_q} \left[1 + \frac{\pi \tan \phi D^3 \gamma}{2N_1} \ln \left(\frac{E_q \pi D}{4N_1} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

N_1 – opór pod podstawą pała [kN],
 E_q – moduł odkształcenia gruntu pod podstawą pała [kPa],
 ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu pod podstawą pała [°],
 γ – ciężar objętościowy gruntu pod podstawą pała [kN/m³],
 D – średnica podstawy pała [m].

Z pomiarów podczas badań statycznych otrzymano zbiór punktów $\{N_p, s_i\}$ [5]. Dane te aproksymowano równaniem Meyera-Kowalowa, uzyskując zależność osiadania od przyłożonego obciążenia w funkcji [3, 4]:

$$s(N) = \frac{CN_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (2)$$

gdzie:

N – siła przyłożona w głowicy pała [kN],
 N_{gr} – nośność graniczna pała przy której pał osiada w sposób niekontrolowany [kN],
 κ, C – dodatkowe parametry krzywej.

W pierwszej części wykresu $0 < s \leq s^*$ spełnione jest równanie:

$$T(s) = N(s) - N_1(s) \quad (3)$$

W drugiej części wykresu $s^* < s < \infty$ spełnione jest równanie:

$$T(s) = T_{max} \quad (4)$$

oraz:

$$N_1(s) = N(s) - T_{max} \quad (5)$$

Wyznaczenie maksymalnego oporu na pobocznicy wiąże się z obliczeniem pochodnej i ekstremum funkcji określonej równaniem:

$$\frac{dN}{ds} - \frac{dN_1}{ds} = \frac{dT}{ds} = 0 \quad (6)$$

Powyższe równanie spełnione jest przy wartości $s = s^*$.

Z równań (5), (6) otrzymano:

$$\frac{1}{\frac{ds}{dN}} - \frac{1}{\frac{ds}{dN_1}} = 0 \quad (7)$$

Dalsze obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu numerycznego:

$$\frac{1}{\frac{ds}{dN}} = \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^{\kappa+1}}{C} \quad (8)$$

oraz:

$$\frac{1}{\frac{ds}{dN_1}} = \left[\frac{\lambda}{\pi D E_q \left(\zeta - \frac{N_1 \cos \phi}{4} \right)^2} + \frac{N_1 \cos \phi}{\pi D E_q \frac{\lambda}{2}} \right]^{-1} \quad (9)$$

gdzie wprowadzono dodatkowo zmienne zastępcze:

$$\lambda = \lambda(N_1) = \cos \phi \left(\frac{\pi \gamma N_1 \sin \phi}{8} - \frac{N_1 \cos^2 \phi}{4} \right)$$

$$\zeta = \zeta(N_1) = 0,125 \left[\pi \gamma D^3 \sin \phi \left(\ln \left(\frac{E_q D^2}{N_1} \right) + \ln(\pi) - 2 \ln(2) \right) \right]$$

Przy osiadaniu równym $s = s^*$, dla $N_1 = N_1^*$ oraz dla $N = N^*$, rozwiązując równanie (7) z zastosowaniem równań (8), (9) otrzymano:

$$N^* = N_{gr} \left[1 - \left(\frac{C \pi D E_q \lambda^{*2}}{\lambda^* + 0,5 N_1^* \cos \phi (\zeta^* + N_1^* \cos \phi)} \right)^{\frac{1}{\kappa+1}} \right] \quad (10)$$

gdzie:

$$\lambda^* = \lambda(N_1^*)$$

$$\zeta^* = \zeta(N_1^*)$$

Podstawiając do równania (2) wartość $N = N^*$, otrzymano:

$$s^*(N_1^*) = \frac{C N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N^*(N_1^*)}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (11)$$

oraz dla $N_1 = N_1^*$

$$s^*(N_1^*) = \frac{4 N_1^*}{\pi D E_q} \left[1 + \frac{\pi \tan \phi D^3 \gamma}{2 N_1^*} \ln \left(\frac{E_q \pi D}{4 N_1^*} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

którego rozwiązaniem jest punkt (s^*, N_1^*)

Wyznaczone wartości s^* , N_1^* i N^* umożliwiają wyznaczenie maksymalnego oporu na pobocznicy z wzoru:

$$T_{max} = N^* - N_1^* \quad (13)$$

Wartość średnią maksymalnych oporów na pobocznicy pała określono z zależności:

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{\pi D L} \quad (14)$$

zaś maksymalne naprężenia pod podstawą pała z równania:

$$\sigma_{1,max} = \frac{4(N_{gr} - T_{max})}{\pi D^2} \quad (15)$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Na podstawie aproksymacji wyników badania statycznego otrzymano następujące parametry opisujące krzywą osiadania:

$$\kappa = 6,775; N_{gr} = 2834,95 \text{ kN}; C = 0,00283 \text{ mm} \cdot \text{kN}^{-1}$$

Dodatkowo z badań terenowych podłoża gruntowego otrzymano [6]:

$$E_q = 63,9 \text{ MPa}; \phi = 30^\circ; \gamma = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$$

Parametry kolumny betonowej:

$$D = 0,4 \text{ m}; L = 6,5 \text{ m}$$

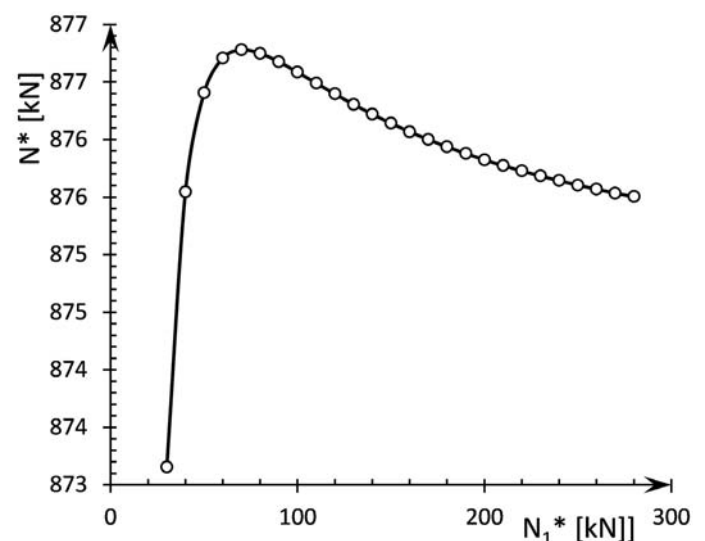
Podstawiając powyższe dane do równania (10), otrzymano wartości sił N^* zależnych od N_1^* i zestawiono w tabl. 1.

Przedstawione w tabl. 1 wyniki obliczeń $N^* = f(N_1^*)$ pokazano na rys. 2.

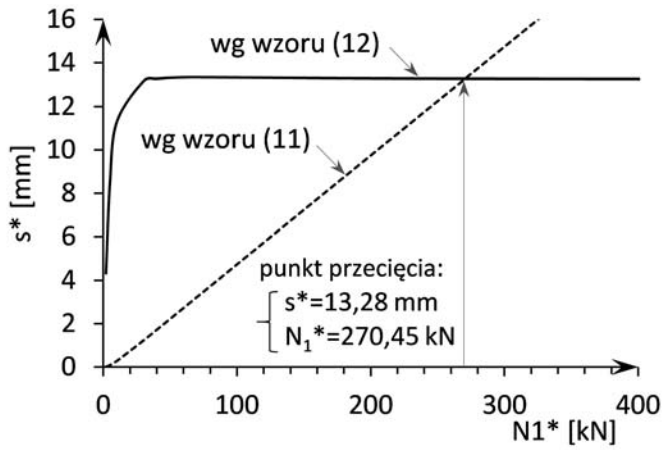
Rozwiązaniem powyższej analizy jest punkt przecięcia dwóch funkcji określonych wzorem (11) i (12). Przedstawiono to na rys. 3.

Tabl. 1. Wartości sił N^* w funkcji N_1^*

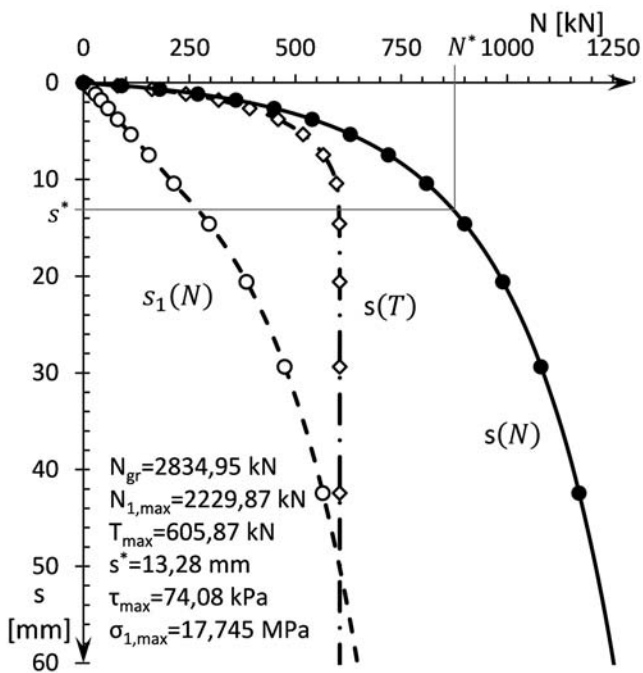
N_1^* [kN]	N^* [kN]	N_1^* [kN]	N^* [kN]	N_1^* [kN]	N^* [kN]
20	865,61	100	876,58	190	875,88
25	870,52	110	876,49	200	875,82
30	873,15	120	876,40	210	875,77
40	875,55	130	876,31	220	875,73
50	876,41	140	876,22	230	875,68
60	876,71	150	876,14	240	875,64
70	876,78	160	876,07	250	875,60
80	876,75	170	876,00	260	875,57
90	876,68	180	875,94	270	875,53



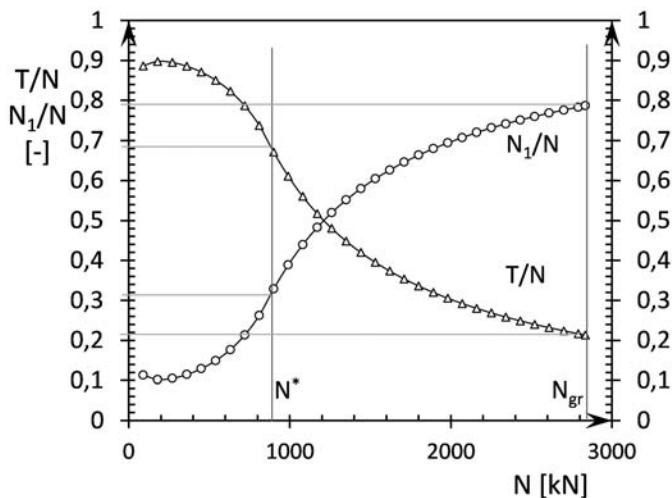
Rys. 2. Zależność $N^* = f(N_1^*)$ dla kolumny SDC2



Rys. 3. Graficzne przedstawienie rozwiązania układu równań (11) i (12)



Rys. 4. Rozkład oporów kolumny SDC2



Rys. 5. Udział tarcia o pobocznice i oporu pod podstawą kolumny w przekazywaniu obciążenia zewnętrznego podczas badania statycznego kolumny SDC2

Rozwiązując układ równań, wyznaczono wartość osiadania $s^* = 13,28$ mm, przy którym są mobilizowane maksymalne naprężenia na pobocznicy kolumny oraz opór pod podstawą, jaki jest mobilizowany na tym etapie obciążenia $N_1^* = 270,45$ kN. Podstawiając otrzymane wartości do równania (10), otrzymano wartość przyłożonej siły w głowicy jaka mobilizuje formowanie się maksymalnych składowych stycznych naprężenia na pobocznicy kolumny $N^* = 875,53$ kN.

Maksymalny opór na pobocznicy z wzoru (13) wynosi:

$$T_{\max} = N^* - N_1^* = 875,53 - 270,45 = 605,08 \text{ kN}$$

Uśrednione na długości kolumny maksymalne składowe styczne naprężenia na pobocznicy kolumny obliczone z wzoru (14) wynoszą:

$$\tau_{\max} = T_{\max} \cdot \pi DL = 74,08 \text{ kPa}$$

Maksymalne naprężenie pod podstawą kolumny obliczone z wzoru (15) wynosi:

$$\sigma_{1,\max} = \frac{4(N_{gr} - T_{\max})}{\pi D^2} = 17,745 \text{ MPa}$$

Uzyskane wyniki umożliwiły graficzne przedstawienie charakteru mobilizacji oporów na pobocznicy i pod podstawą kolumny podczas badania statycznego (rys. 4).

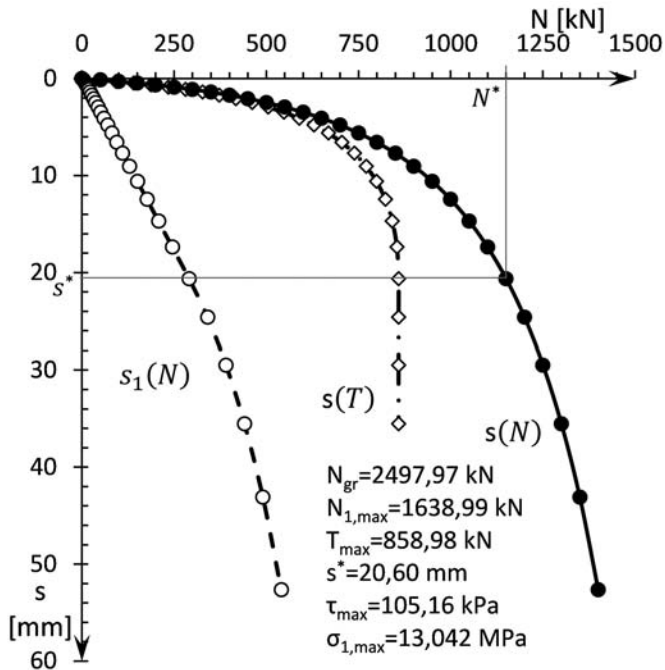
Na podstawie wyznaczonych zależności istnieje możliwość wyznaczenia udziału tarcia o pobocznice podczas kolejnych etapów obciążania. Zależność tę przedstawiono na rys. 5.

Przyrost nośności pobocznicy do nośności podstawy jest większy w początkowym etapie obciążania, aż do osiągnięcia ekstremum wynoszącego w przybliżeniu 89% siły przyłożonej w głowicy. Świadczy to o tym, że obciążenie zewnętrzne początkowo przekazywane jest do podłoża gruntowego poprzez tarcie o pobocznice, ponieważ opór pod podstawą jest mobilizowany wolniej. Podobne zależności wykazali również autorzy prac [1, 2].

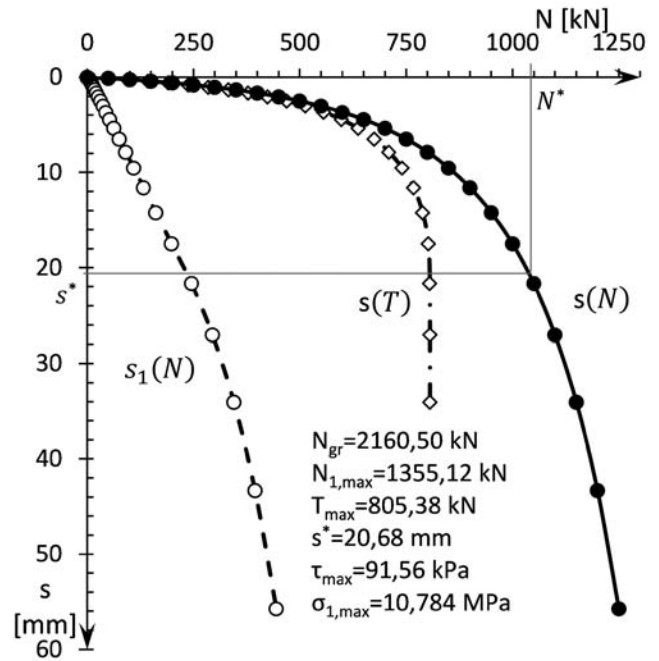
Powyższą metodą wyznaczono maksymalne opory na pobocznicy czterech kolumn betonowych wykonanych w technologii przemieszczeniowej (*Soil Displacement Column*) [6]. Kolumny betonowe o średnicy $D = 0,4$ m. Wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabl. 2 i na rys. 6, 7, 8.

Tabl. 2. Zestawienie obliczeń dla czterech kolumn SDC

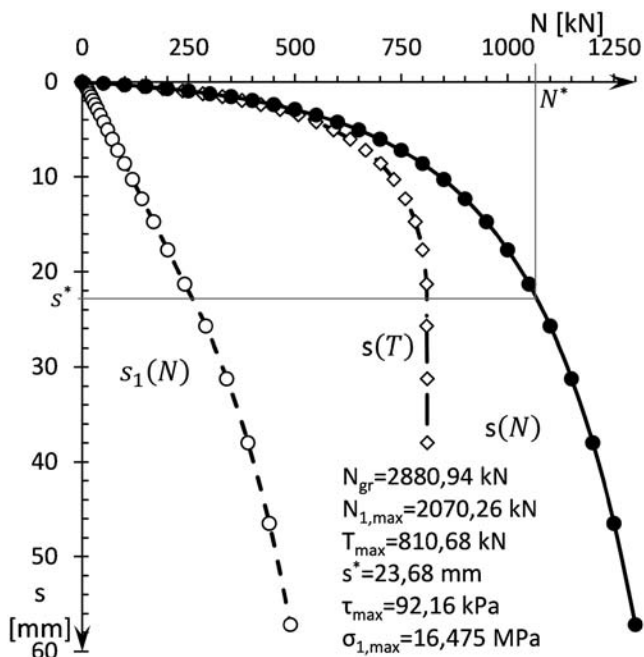
		SDC1	SDC2	SDC3	SDC4
L	[m]	6,5	6,5	7,0	7,0
E_q	[MPa]	44,60	63,90	35,65	35,70
ϕ	[°]	18	30	18	18
γ	[kN/m ³]	21	20	21	21
N_{gr}	[kN]	2497,97	2834,95	2880,94	2160,50
T_{\max}	[kN]	858,98	605,08	810,68	805,38
$N_{1,\max}$	[kN]	1638,99	2229,87	2070,26	1355,12
s^*	[mm]	20,60	13,28	23,68	20,68
τ_{\max}	[kPa]	105,16	74,08	92,16	91,56
$\sigma_{1,\max}$	[MPa]	13,043	17,745	16,475	10,784



Rys. 6. Rozkład oporów na pobocznicy i pod podstawą kolumny SDC 1



Rys. 8. Rozkład oporów na pobocznicy i pod podstawą kolumny SDC 4



Rys. 7. Rozkład oporów na pobocznicy i pod podstawą kolumny SDC 3

WNIOSKI

W artykule zaproponowano metodę wyznaczenia średniej wartości maksymalnych składowych stycznych naprężenia na pobocznicy podczas próbnego obciążania statycznego kolumny betonowej. Przedstawiona metoda może być również stosowana przy analizie rozkładu oporów podczas badań pali.

Opór na pobocznicy szybko się mobilizuje, ale już przy osiadaniu w zakresie od 13 do 24 mm osiąga wartość maksymalną. Ma to duże znaczenie w projektowaniu pali ze względu na do-

celowe osiadania, które najczęściej nie mogą przekraczać 0,1D (dla przedmiotowych kolumn 40 mm).

W pierwszych etapach badania statycznego obciążenie zewnętrzne przekazywane jest do podłoża gruntowego głównie poprzez tarcie o pobocznicy (około 90% przyłożonej siły w głowicy kolumny betonowej).

Na podstawie kolumny SDC2 można stwierdzić, że maksymalne tarcie na pobocznicy wynosi zaledwie 21% nośności granicznej. Nie mniej jednak, przy nośności projektowanej wynoszącej 900 kN nośność pobocznicy wynosi aż 67%, a przy mniejszych obciążeniach do 90% przyłożonej siły w głowicy kolumny.

Informacja o maksymalnym oporze na pobocznicy pozwala na wprowadzenie ewentualnych zmian w projekcie i dostosowanie długości do wymaganej nośności pala.

W zaproponowanej metodzie przyjęto, że osiadanie podstawy pala może być określone tak jak dla stopy fundamentowej. Uzyskane wyniki obliczeń potwierdzają słuszność takiego założenia.

W celu usprawnienia wykonania obliczeń dla pali w naturze, przygotowano pakiet programowy, który dla zbioru punktów $\{N_p, s_i\}$ uzyskanych z próbnego obciążenia, zbadanych parametrów gruntu określonych przez: ϕ, E_q, γ , oraz dla znanej geometrii pala pozwala na znalezienie maksymalnego oporu na pobocznicy T_{max} oraz oporu pod podstawą pala $N_{1,max}$.

LITERATURA

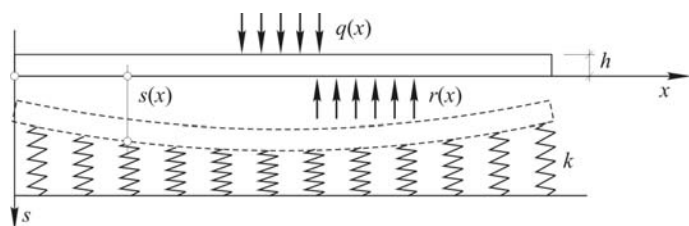
1. De Cock F.A., Sense and sensitivity of pile load-deformation behaviour. Deep foundations on bored and auger piles – Van Impe & Van Impe (eds). Taylor & Francis Group. London, 2009.
2. Krasiński A., Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. Politechnika Gdańska, monografia, Gdańsk, 2013.

3. Meyer Z., Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów, monografia, , Szczecin, 2012.

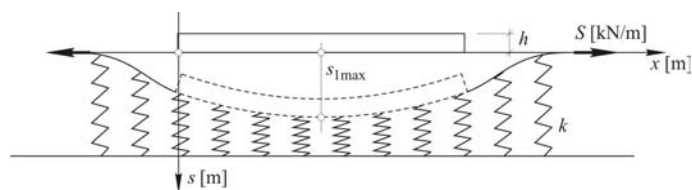
4. Meyer Z. Szmechel G., Wybór funkcji aproksymującej parametry modelu- krzywej obciążenie osiadanie dla pali prefabrykowanych na podstawie testów statycznych, Politechnika Lubelska, Lublin 2013.

5. Meyer Z., Żarkiewicz K., Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, Wydanie dwumiesięczne, 1/2014.

6. Żarkiewicz K., Weryfikacja zależności wzorów na osiadanie kolumn betonowych w oparciu o badania terenowe. Praca magisterska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2012.



Rys. 1. Model podłoża jednoparametrowego



Rys. 2. Dwuparametrowy model podłoża