

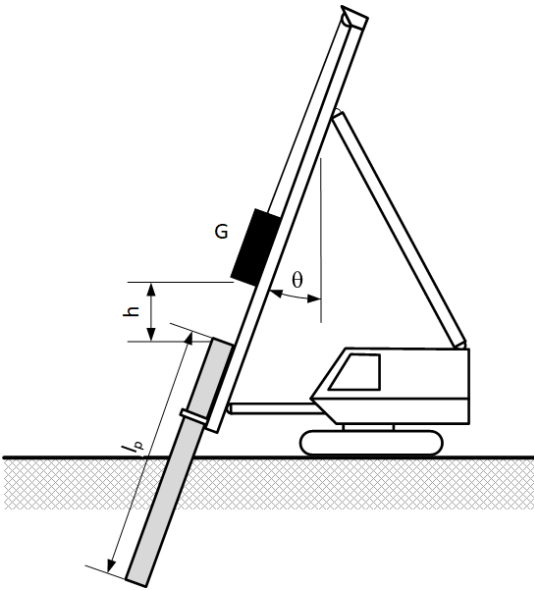
Formuła duńska

FAQ, czyli wszystko co inżynierowi wypada wiedzieć, a nie ma kogo zapytać ...

Co to jest formuła duńska?

Formuła duńska $R_{FD} = \eta \cdot h \cdot G / (s + 0,5 \cdot s_0)$ to jeden ze wzorów dynamicznych do szacowania nośności pali wbijanych. Została opracowana w 1955 roku przez duńskiego inżyniera Andreasa Knudsen i od tego czasu jest powszechnie wykorzystywana.

Wykorzystane oznaczenia: R_{FD} to nośność graniczna pala, η to efektywność młota, h to wysokość podrzutu/spadu młota, G to ciężar młota, s to wpęd pala, a s_0 to sprężyste skrócenie trzonu pala ze wzoru $s_0 = [2 \cdot \eta \cdot h \cdot G \cdot l_p / (A \cdot E)]^{0,5}$, w którym l_p jest długością pala, A polem jego przekroju, a E modułem sztywności materiału pala. Efektywność młota jest z kolei obliczana ze wzoru $\eta = \eta_0 [1 - \mu \cdot \tan(\theta)]$, gdzie η_0 jest wyjściową efektywnością młota, μ współczynnikiem tarcia młota o maszt, a θ kątem odchylenia masztu od pionu.



Czy wykorzystując formułę duńską otrzymuję wiarygodne wyniki oszacowania nośności?

Tak, pod warunkiem jej prawidłowego zastosowania. Każdy wzór dynamiczny ma określony zakres stosowania, ograniczony, np. do konkretnego rodzaju pala lub/i warunków gruntowych. Formułę duńską w Polsce zaleca się wykorzystywać do pali wbijanych w grunty sypkie lub uwarstwione z przewagą sypkich.

Formuła duńska jest na tyle wiarygodna, że została wykorzystywana w normie duńskiej jako podstawowa metoda określania nośności pali wbijanych w grunty sypkie. W tym samym celu jest wykorzystywana w normie polskiej

PN-83/B-02482. Aktualna polska norma PN-EN 1997-1 również umożliwia wykorzystanie wzorów dynamicznych, w tym formuły duńskiej, do określania nośności pali wbijanych.

Skąd wziąć dane niezbędne do wyliczenia nośności pala na podstawie formuły duńskiej?

Formuła wykorzystuje podstawowe parametry pala, młota i procesu wbijania. Dla wbijanych pali żelbetowych i sprawnych młotów hydraulicznych można przyjmować:

- wyjściową sprawność młota $\eta_0 = 1,0$;
- współczynnik tarcia młota po maszcie $\mu = 0,1$;
- kąt pochylecia masztu $\theta = 0 \div 30$ (45) stopni;
- moduł sztywności dla żelbetu $E = 20$ GPa;
- wysokość spadcu młota $h = 0 \div 1,0$ (1,2) m;
- ciężar młota $G = 15 \div 90$ (110) kN.

Pozostałe parametry, takie jak:

- długość pala $l_p = 4 \div 30$ (40) m;
- przekrój pala $A = a^2$, gdzie a jest wymiarem boku przekroju pala (0.2) 0.25 m, 0.30 m, 0.35 m lub 0.40 (0.45) m

stanowią opis rozwiązania fundamentu palowego.

Jak wykorzystać formułę duńską?

Obliczoną formułą duńską nośność pala można wykorzystać do:

- określenia kryterium wpędu jaki powinny spełniać pale;
- bieżącego szacowania nośności wbijanych pali;
- porównania nośności poszczególnych pali w obrębie fundamentu palowego,
- pośredniej oceny jednorodności warunków gruntowych w obszarze fundamentu palowego;
- szacowania przyrostu nośności w czasie na podstawie nośności wyznaczanych w kolejnych próbach dobicia pala lub/i
- wytypowania pali o największych wpędach do wykonania kontrolnych próbnyc obciążeni dynamicznych lub/i statycznych.

Czy dostępne są przykłady liczbowe wykorzystania formuły duńskiej?

Przykład. Należy wyznaczyć nośność graniczną pionowych pali o przekroju $A=0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}$ o długości $l_p = 13 \text{ m}$, które w trakcie wbijania sprawnym młotem hydraulicznym o ciężarze $G = 60 \text{ kN}$ zrzucanym z wysokości $h = 0,6 \text{ m}$ osiągnęły wpędy $s_1 = 8 \text{ mm}$ (25 uderzeń na $0,2 \text{ m}$) i $s_2 = 7,4 \text{ mm}$ (27 uderzeń na $0,2 \text{ m}$).

Obliczono powierzchnię przekroju pala $A = 0,3 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = 0,09 \text{ m}^2$, sprawność młota $\eta = \eta_0 [1 - \mu \cdot \tan(\theta)] = 1,0 \cdot [1 - 0,1 \cdot \tan(\theta)] = 1,0$ i sprężyste skrócenie trzonu pala

$$s_0 = [2 \cdot \eta \cdot h \cdot G \cdot l_p / (A \cdot E)]^{0,5} = [2 \cdot 1,0 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 60 \text{ kN} \cdot 12 \text{ m} / (0,09 \text{ m}^2 \cdot 20\,000 \text{ kN/m}^2)]^{0,5} = 0,0228 \text{ m}.$$

Nośność graniczna pala wyznaczona z formuły duńskiej $R_{FD1} = 1,0 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 60 \text{ kN} / (0,008 \text{ m} + 0,5 \cdot 0,0228 \text{ m}) = 1856 \text{ kN}$

$$R_{FD2} = 1,0 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 60 \text{ kN} / (0,0074 \text{ m} + 0,5 \cdot 0,0228 \text{ m}) = 1914 \text{ kN}$$

Jak na podstawie wyliczonej wartości nośności granicznej oszacować nośność obliczeniową pala?

Najlepiej w tym celu wykorzystać dostępne procedury normowe. Na przykład wg PN-EN 1997-1, Załącznik normatywny A, Tablica A.11 dla dwóch wyników dynamicznych badań udarowych z przykładu obliczeniowego $\xi_5 = 1,6$, a $\xi_6 = 1,50$. Współczynniki ξ należy przemnożyć przez $1,10$ ze względu na zastosowanie wzoru dynamicznego z pomiarem quasi-sprężystego przemieszczenia głowicy pala w trakcie uderzenia, stąd $\xi_5 = 1,6 \cdot 1,10 = 1,76$ a $\xi_6 = 1,50 \cdot 1,10 = 1,65$. Wartość minimalna oszacowanej nośności granicznej to $R_{cm,min} = 1856 \text{ kN}$, a wartość średnia to $R_{cm,mean} = 1885 \text{ kN}$. Stąd $R_{c,k} = \min(R_{cm,mean} / \xi_5; R_{cm,min} / \xi_6) = \min(1088 \text{ kN}; 1125 \text{ kN}) = 1088 \text{ kN}$. Dla pali wciskanych $\gamma_c = 1,1$. Nośność obliczeniowa określona na podstawie wpędów i formuły duńskiej dla dwóch pali z przykładu obliczeniowego to:

$$R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_c = 989 \text{ kN}.$$

Czy przy tak wysokich wartościach współczynników korelacyjnych warto wykorzystywać formułę duńską do szacowania nośności pali?

Tak, zdecydowanie warto szacować nośności formułą duńską ponieważ jej wykorzystanie nie wymaga ponoszenia prawie żadnych dodatkowych kosztów. Szczególnie efektywne jest to w przypadku niewielkich fundamentów palowych, gdzie koszt przeprowadzenia próbnego obciążenia statycznego lub dynamicznego może być większy niż korzyści wynikające z jego przeprowadzenia. Również w przypadku dużych fundamentów palowych wykorzystanie for-

muły duńskiej może być efektywne. Wykorzystanie dużej liczby wyników szacowania nośności zmniejsza w sposób istotny wartości współczynników korelacyjnych i podnosi wiarygodność oszacowanych wartości.

Wykorzystanie formuły duńskiej zwiększa zakres wiedzy o wykonanym fundamencie palowym umożliwiając—rzadkie w przypadku innych technologii palowych—**oszacowanie nośności wszystkich pali w fundamencie.**

Czy dostępne są gotowe arkusze obliczeniowe z przykładem analizy nośności pala przy użyciu formuły duńskiej?

Tak. Na stronie www.aarsleff.com.pl w serwisie projektowym dostępny jest gotowy arkusz do wyznaczania nośności granicznej prefabrykowanego żelbetowego pala wbijanego z wykorzystaniem formuły duńskiej w formacie Excela i SMath'a.

Obliczenie nosności pala z wykorzystaniem formuły duńskiej

$\theta = 0 \text{ deg}$ Pochylenie masztu

$\mu = 0,1$ Współczynnik tarcia młota o maszt

$G = 60 \text{ kN}$ Ciężar młota

$\eta_0 = 1,0$ Efektywność początkowa młota

$h = 0,6 \text{ m}$ Wysokość spadu młota w pionie

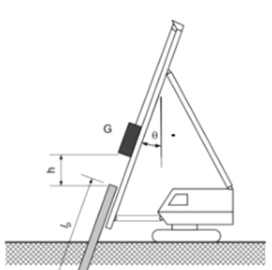
$l_p = 13 \text{ m}$ Długość pala

$A = 0,09 \text{ m}^2$ Powierzchnia przekroju poprzecznego pala

$E = 20 \text{ GPa}$ Moduł sprężystości materiału pala - dla pali żelbetowych 20 GPa

$\Delta = 0,2 \text{ m}$ Odcinek zliczania uderzeń młota

$n = 25$ Liczba uderzeń na odcinku zliczania



$s = \frac{\Delta}{n} = 8 \text{ mm}$ Wpęd na końcowym odcinku pograżania

$\eta = \eta_0 \cdot (1 - \mu \cdot \tan(\theta)) = 1$ Efektywność młota

$s_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot h \cdot G \cdot l_p}{A \cdot E}} = 0,0228 \text{ m}$ Oszacowanie sprężystego skrócenia pala

$R_{FD} = \frac{\eta \cdot h \cdot G}{s + 0,5 \cdot s_0} = 1856 \text{ kN}$ Nośność graniczna pala na podstawie formuły duńskiej

AARSLEFF  **GROUND ENGINEERING**

Aarsleff sp. z o.o., al. Wyciągowa 6, 02-681 Warszawa,
Tel. (+48) 22 648 88 34-35, Fax: (+48) 22 648 88 36

e-mail: aarsleff@aarsleff.com.pl, Internet: www.aarsleff.com.pl