

Pale fundamentowe – wprowadzenie

Celem niniejszego przewodnika jest przedstawienie problematyki stosowania oprogramowania pakietu GEO5 do obliczania fundamentów palowych.

Pakiet oprogramowania GEO5 zawiera trzy odrębne programy służące do analizy pali – **Pal**, **Pal CPT** oraz **Grupa Pali**. Niniejszy rozdział przedstawia i przybliża, który z programów należy zastosować w konkretnych warunkach – poszczególne programy są opisane w kolejnych rozdziałach.

Nośność pionowa fundamentów palowych może być wyznaczana według różnych metod:

- **z wykorzystaniem badań statycznych:** badania takie wymagane są w niektórych krajach, obliczenia statyczne stanowią tam jedynie wstępny projekt pali fundamentowych;
- **obliczenia w oparciu o parametry wytrzymałości gruntu na ścinanie:** wykorzystywane w metodzie według NAVFAC DM 7.2, metodzie Tomlinsona, metodzie według normy CSN 73 1002 oraz metodzie naprężeń efektywnych w programach PAL oraz GRUPA PALI;
- **obliczenia z wykorzystaniem wyników sondowań statycznych CPT:** program PAL CPT;
- **obliczenia wykorzystujące sformułowanie bazujące na współczynnikach krzywej regresji obciążenie-osiadanie uzyskiwanych na podstawie badań pali pod obciążeniem statycznym** (według Masopusta): program PAL, nośność pionowa pala określana jest z krzywej obciążeniowej dla odpowiedniej (dopuszczalnej) wartości osiadania (norma CSN 73 1002 określa wartość dopuszczalną osiadania na poziomie $s_{lim} = 25.0 \text{ mm}$).
- **obliczenia z wykorzystaniem parametrów gruntu z hipotezy Mohra-Columba (kąt tarcia wewnętrznego, spójność) oraz parametrów odkształceniowych:** metoda sprężysta w programie Pal oraz Grupa Pali;
- **obliczenia przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych:** program MES.

Przedstawiona powyżej lista pokazuje, że pale mogą być analizowane wieloma metodami z wykorzystaniem różnorodnych parametrów wejściowych. Wyniki obliczeń mogą być identyczne, ale często mogą się znacząco różnić.

Zaletą oprogramowania GEO5 jest możliwość zastosowania przez użytkownika wielu różnych wariantów i metod obliczeniowych, celem określenia najbardziej prawdopodobnego zachowania fundamentu palowego oraz wyznaczenia całkowitej nośności, czy też osiadania pala lub grupy pali.

Nośność pionowa fundamentów palowych obliczania jest w programach pakietu GEO5 tylko dla obciążenia pionową siłą normalną (z jednym wyjątkiem: Grupa Pali – metoda sprężysta). Obciążenie siłami poziomymi, momentami zginającymi i skręcającymi nie jest uwzględniane przy obliczeniach nośności pionowej pali.

Procedura obliczania nośności pionowej pojedynczego pala w programie GEO5 – PAL przedstawiona została w Przewodniku Inżyniera nr 13 oraz 14, natomiast obliczenia nośności pionowej tego samego pala z wykorzystaniem wyników sondowań statycznych CPT przedstawiono w Przewodniku Inżyniera nr 15.

Nośność pozioma fundamentów palowych:

Celem obliczeń pala obciążonego poziomo jest wyznaczenie przemieszczenia poziomego pala oraz wykresu sił wewnętrznych wzdłuż poboczniczy pala.

W przypadku analizowania pojedynczego pala, przemieszczenie poziome oraz zbrojenie pala zależy od modułu reakcji poziomej podłoża oraz obciążenia poprzecznego lub momentu zginającego. Przykład obliczeń przedstawiony został w Przewodniku Inżyniera nr 16. Obliczenia tego zagadnienia w przypadku grupy pali przedstawione zostały w Przewodniku Inżyniera nr 18.

Osiadanie fundamentów palowych:

Rzeczywista nośność pala jest bezpośrednio powiązana z jego osiadaniem – można stwierdzić, że każdy pal osiada po wpływie obciążenia i ulega pionowemu odkształceniu.

Osiadanie pojedynczego pala w programie PAL może być wyznaczane według poniższych metod:

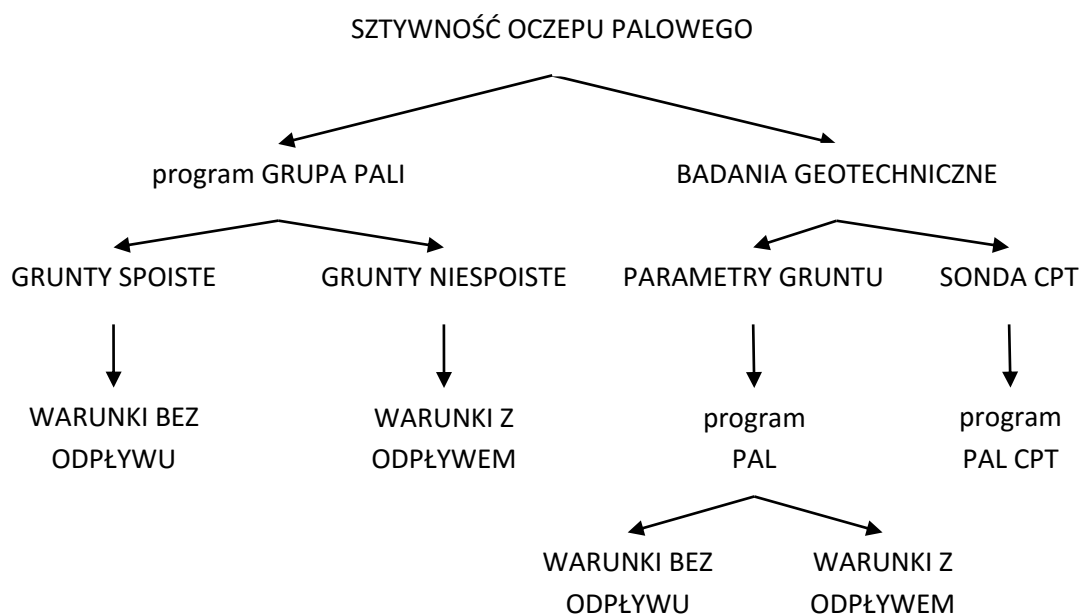
- **według Masopusta** (nieliniowa): program prowadzi obliczenia osiadania pojedynczego pala w oparciu o współczynniki krzywej regresji obciążenie–osiadanie dla poboczniczy oraz podstawy pala.
- **według Poulosa** (liniowa): program prowadzi obliczenia całkowitego osiadania w oparciu o znaną nośność podstawy pala R_b oraz nośność poboczniczy pala R_s .
- **metoda sprężysta**: program prowadzi obliczenia osiadania z zastosowaniem krzywej obciążeniowej, na podstawie danych parametrów gruntu, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych.

Program PAL wykreśla krzywą obciążeniową (obciążenie-osiadanie) dla wszystkich metod obliczeniowych.

Osiadanie grupy pali omówione zostało w Przewodniku Inżyniera nr 17. Osiadanie pali projektowanych z wykorzystaniem wyników sondowań CPT przedstawiono w Przewodniku Inżyniera nr 15.

Wybór programu

1. **decyzja** odnośnie sztywności oczepu palowego. Zakładając nieskończoną sztywność oczepu palowego należy skorzystać z programu Grupa Pali. W pozostałych przypadkach analizujemy fundament palowy jako pojedyncze pale.
2. **decyzja** odnośnie przeprowadzonych badań geotechnicznych. W przypadku, gdy dostępne są wyniki sondowań CPT do obliczeń pojedynczego pala lub grupy pali należy skorzystać z programu Pal CPT (patrz Przewodnik Inżyniera nr 15). W pozostałych przypadkach, gdy do dyspozycji są wyłącznie parametry podłoża gruntowego, prowadzimy obliczenia z wykorzystaniem programu Pal lub Grupa Pali.



Program udostępnia dwa **rodzaje obliczeń**:

- analiza w warunkach z odpływem: parametry efektywne gruntów φ_{ef}, c_{ef} wykorzystywane są jako domyślne w programach Pal oraz Grupa Pali przy obliczeniach zgodnie z metodą *CSN 73 1002* oraz *metodą naprężeń efektywnych*;
- analiza w warunkach bez odpływu: wyłącznie wartość spójności całkowitej gruntu c_u jest wprowadzana do programów Pal oraz Grupa Pali. Nośność pionowa pojedynczego pala obliczana jest zgodnie z metodą *Tomlinsona*, podczas gdy nośność grupy pali obliczana jest jako nośność bryły gruntu zgodnie z *FHWA*.

Metoda NAVFAC DM 7.2 łączy obydwie przedstawione powyżej procedury obliczeniowe. Istnieje możliwość ustawienia dla danej warstwy gruntu, czy będzie on analizowana w warunkach z odpływem (grunty niespoiste), czy też bez odpływu (grunty spoiste).

Ogólne sformułowanie problemu:

Obliczyć nośność pionową oraz osiadanie fundamentu palowego (patrz rysunek) przy zadanym profilu geotechnicznym, następnie wyznaczyć przemieszczenie poziome pali oraz zwymiarować zbrojenie poszczególnych pali. Fundament palowy składa się z czterech pali wierconych średnicy $d = 1.0 \text{ m}$ o długości $l = 12.0 \text{ m}$. Wypadkowa obciążenia całkowitego N, M_y, H_x działa w górnej płaszczyźnie oczepu palowego (głowicy pali) w jego środku. Pale wykonane zostaną betonu zbrojonego klasy C 20/25.

Obciążenie działające na pale

Aby uprościć zadanie będziemy zawsze rozpatrywać w programie jeden przypadek obciążeń.

Określenie sił działających na fundament palowy wykonuje się inaczej w zależności od charakteru konstrukcji oraz dalszych obliczeń, tj. czy obliczamy pojedynczy pał, czy też grupę pali.

Grupa pali

Zakładamy, że oczep palowy zwińcżający pale jest sztywny. Przyjmijmy płytę grubości $t = 1.0 \text{ m}$. Dla przedmiotowego przypadku przyłożymy wypadkową reakcję w środku oczepu palowego.

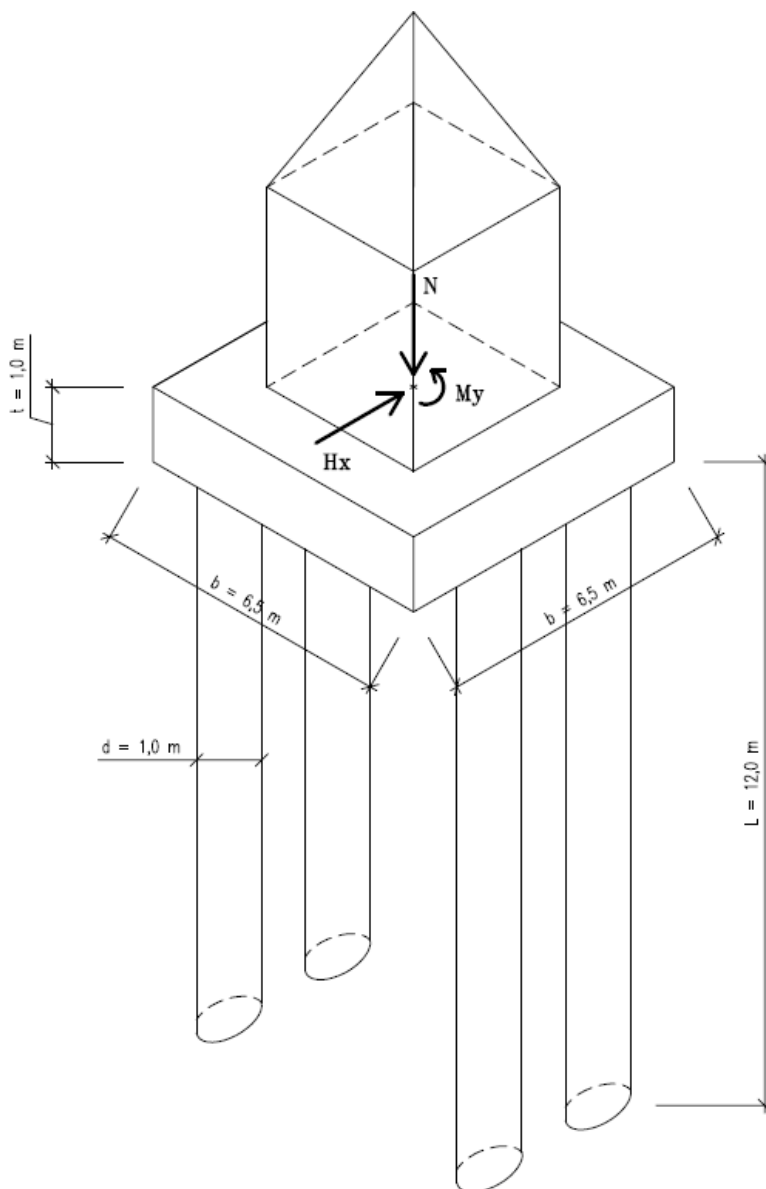
Uwaga: Prosty sposób wyznaczania obciążenia działającego na grupę pali poprzez zastosowane dowolnego programu do obliczeń statycznych przedstawiony został w Podręczniku Użytkownika do programu Grupa Pali "[Obciążenie działające na grupę pali](#)".

a) Obciążenia projektowe (obliczeniowe):

- Siła normalna pionowa: $N = 5680 \text{ kN}$,
- Moment zginający: $M_y = 480 \text{ kNm}$,
- Siła pozioma: $H_x = 310 \text{ kN}$.

b) Obciążenia użytkowe (charakterystyczne):

- Siła normalna pionowa: $N = 4000 \text{ kN}$,
- Moment zginający: $M_y = 320 \text{ kNm}$,
- Siła pozioma: $H_x = 240 \text{ kN}$.



Schemat ogólny zadania – fundament palowy

Pojedynczy pal

Jeżeli zwieńczający pale oczep ma małą sztywność na zginanie (jest wiotki) lub budynek jest posadowiony bezpośrednio na głowicach pali schemat statyczny konstrukcji jest inny – wypadkowa reakcja uzyskana z programu do obliczeń statycznych (np. GEO 5 – Płyta, FIN 3D, SCIA Engineer, Dlubal RStab) przykładana jest bezpośrednio do głowic poszczególnych pali.

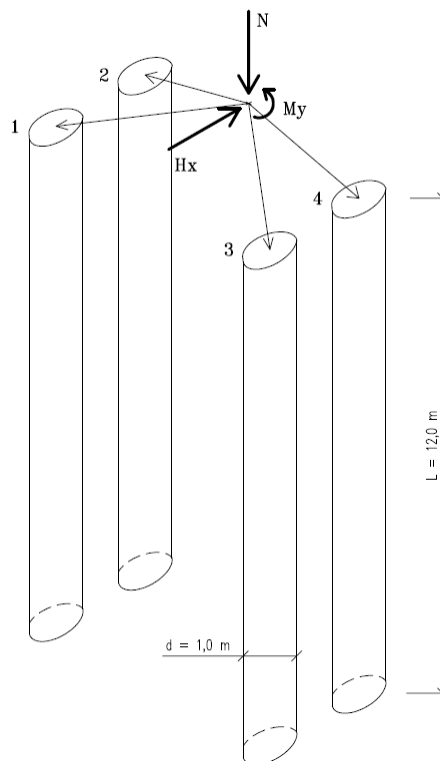
Aby uprościć zadanie przeprowadzimy obliczenia pala z uwzględnieniem tylko jednego przypadku obciążeń w programie.

a) Obciążenia projektowe (obliczeniowe):

- Siła normalna pionowa: $N_1 = 1450 \text{ kN}$,
- Moment zginający: $M_{y,1} = 120 \text{ kNm}$,
- Siła pozioma: $H_{x,1} = 85 \text{ kN}$.

b) Obciążenia użytkowe (charakterystyczne):

- Siła normalna pionowa: $N_1 = 1015 \text{ kN}$,
- Moment zginający: $M_{y,1} = 80 \text{ kNm}$,
- Siła pozioma: $H_{x,1} = 60 \text{ kN}$.



Schemat działania obciążenia – obciążenie rozkładane jest na pojedyncze pale

Uwaga: Jeżeli przyjmiemy takie same wymiary oraz zbrojenie pali możemy sprowadzić obliczenia grupy pali do obliczeń pojedynczego pala z uwzględnieniem kombinacji obciążeń działających na wszystkie pale.

Profil geotechniczny podłoża

- od 0,0 do 6,0 m: łł piaszczysty (SaFCl, konsystencja twardoplastyczna),
- poniżej 6,0 m: Piasek drobny (FSa, średniozagęszczony).

Uwaga: Podstawowe parametry gruntu są takie same dla obliczania pali pojedynczych oraz grupy pali. Wartości parametrów gruntów zebrano w poniższej tabeli.

Parametry gruntu / Klasyfikacja	łł piaszczysty twardoplastyczny	Piasek drobny średniozagęszczony
Ciężar objętościowy γ [kN/m^3]	18,5	17,5
Ciężar gruntu nawodnionego γ_{sat} [kN/m^3]	20,5	19,5
Spójność gruntu c_{ef} / c_u [kPa]	14,0 / 50,0	0 / 0
Kąt tarcia wewnętrznego φ_{ef} [$^\circ$]	24,5	29,5
Współczynnik adhezji α [–]	0,6	–
Współczynnik nośności pala β_p [–]	0,3	0,45
Współczynnik Poissona ν [–]	0,35	0,3
Moduł edometryczny E_{oed} [MPa]	8,0	21,0
Moduł odkształcenia E_{def} [MPa]	5,0	15,5
Rodzaj gruntu	łł (grunt spoisty)	Piasek, żwir (grunt niespoisty)
Kąt dyspersji β [–]	10,0	15,0
Współczynnik spręż. podłoża k [MN/m^3]	60,0	150,0
Moduł ściśliwości poziomej n_h [MN/m^3]	–	4,5
Moduł sprężystości E [MPa]	5,0	15,5

Tabela z parametrami gruntów – fundamenty palowe (podsumowanie)

Przewodniki Inżyniera dotyczące fundamentów palowych:

- Przewodnik Inżyniera nr 12: Pale fundamentowe – wprowadzenie
- Przewodnik Inżyniera nr 13: Analiza nośności pionowej pojedynczego pala
- Przewodnik Inżyniera nr 14: Analiza osiadania pojedynczego pala

- *Przewodnik Inżyniera nr 15:* Analiza nośności pionowej oraz osiadania pojedynczego pala projektowanego w oparciu o wyniki sondowań CPT
- *Przewodnik Inżyniera nr 16:* Analiza nośności poziomej pojedynczego pala
- *Przewodnik Inżyniera nr 17:* Analiza nośności pionowej i osiadania grupy pali
- *Przewodnik Inżyniera nr 18:* Analiza stanu przemieszczenia oraz wymiarowanie grupy pali.