

Title: Centrifuge Modelling of Tapered Pile Installation Effects in Sand

Abstract

The growing demand for efficient and sustainable infrastructure has increased interest in optimizing deep foundation systems, particularly pile foundations. This study investigates the behavior of tapered piles during installation and subsequent loading using centrifuge modeling in plane-strain conditions. A series of centrifuge tests at 25g were conducted at the GERS-CG centrifuge facility (Gustave Eiffel University, France) using model walls (representing 2D plane strain model piles) installed in dense Fontainebleau sand (NE34). Three wall models, a straight wall and two tapered walls with 0.75° and 1.5° taper angles, were tested in a transparent container under plane-strain conditions. All models had the same volume, with an average breadth of 16 mm and a width-to-breadth ratio of 12.5. They were installed by continuous pushing at 0.1 mm/s to a final embedment of 224 mm, corresponding to a slenderness ratio of 14. The load cell at the model wall head recorded the total axial force during installation, followed by static loading. Stress mobilized in the soil during installation and static loading was measured using five stress sensors placed at different depths and distances from the wall. In addition, three stress sensors were attached to the model wall to measure soil–wall contact stress during installation and subsequent loading.

The evolution of horizontal stress in the soil mass and normal stress on the wall surface were measured during monotonic installation and subsequent static compression loading.

Installation in sand induced additional horizontal stress in the surrounding soil and increased normal stress at the wall–soil interface. The maximum horizontal stress in the soil mass occurred just before the wall base passed the sensor level, typically near a depth of one wall breadth (1B) above the sensing point. For the straight wall, a continuous decrease in horizontal stress was recorded after the wall base passed the sensor level. In contrast, the tapered walls exhibited re-mobilization of horizontal stress, with the extent of re-mobilization dependent on the taper angle. They also induce higher normal stress at the pile shaft and higher horizontal stress in the soil mass. Particle Image Velocimetry (PIV) was employed to analyze soil displacements and strain fields at different embedment depths. Both horizontal and vertical displacement contours, as well as

volumetric and shear strain fields, were examined around the penetrating walls. PIV analysis revealed distinct displacement and strain contour patterns depending on wall type and penetration depth. The soil zone affected by installation was significantly larger for tapered walls than for the straight wall. Horizontal displacements near the ground surface are higher for tapered walls compared to straight ones. However, near the model base, horizontal displacements were significantly reduced for tapered walls.

The behavior of bored tapered wall models was investigated numerically using the Finite Element Method (FEM) and Limit Analysis. FEM was used to evaluate the load-displacement behavior, while Limit Analysis was employed to estimate the failure loads and mechanisms for each model. Numerical analysis of the load-displacement behavior and failure mechanisms of model walls showed the significant influence of taper geometry on bearing capacity. Numerical predictions underestimated experimental results and are due to the exclusion of installation effects in the models. The installation effects concerning the shaft and the base of the wall were estimated. These installation effects increase with taper angle. Although the analysis was conducted under plane-strain conditions, the results can be qualitatively extended to monotonically installed tapered piles.

Key words: Centrifuge modeling, Tapered pile, installation effects, Stress mobilization, Soil displacement

Tytuł : Efekty instalacji w piasku pali zwięzających się z głębokością na podstawie badań w wirówce geotechnicznej

Streszczenie

Rosnące zapotrzebowanie na efektywne i zrównoważone budownictwo infrastrukturalne zwiększa zainteresowanie optymalizacją projektowania posadowień, a w szczególności fundamentów posadowionych na palach. Niniejsza praca dotyczy pali stożkowych, zbadanych w wirówce geotechnicznej przy przyspieszeniu wynoszącym 25g, w warunkach płaskiego stanu odkształcenia podczas procesu instalacji oraz próbnego obciążenia. Seria testów została wykonana w Centrum Modelowania Fizycznego GERS-SG na Uniwersytecie Gustave Eiffel we Francji. Instalacji w gruncie modeli ścian trapezoidalnych (odzwierciedlających warunki płaskiego stanu odkształcenia) dokonano w piasku Fontainebleau (NE34). W kontenerze z transparentną ścianą przetestowano trzy modele ścian: prostą i dwie trapezoidalne, o kącie nachylenia powierzchni ściany wynoszącym odpowiednio 0.75° i 1.5° . Wszystkie modele miały tę samą objętość ze średnią szerokością wynoszącą 16 mm i stosunkiem długości podstawy do szerokości wynoszącym 12.5. Modele wciskano monotonicznie z powierzchni gruntu ze stałą prędkością 0,1 mm/min do osiągnięcia zagłębienia 224 mm, co odpowiada smukłości ściany równej 14. Pomiar siły podczas instalacji i obciążenia statycznego modelu wykonano za pomocą czujnika w głowicy ściany. Naprężenia w masywie gruntowych zmierzono za pomocą pięciu czujników w różnych lokalizacjach. Każda ze ścian była dodatkowo wyposażona w trzy czujniki naprężenia kontaktowego na powierzchni bocznej.

Instalacja ściany wywołała wzrost składowej poziomej naprężenia w gruncie i naprężenia normalnego działającego na powierzchnię ściany. Maksymalne naprężenie boczne w gruncie zarejestrowano tuż przed osiągnięciem przez ścianę poziomu czujnika, zazwyczaj około 1 szerokości ściany powyżej punktu pomiaru. W przypadku ściany prostej, stwierdzono ciągły spadek składowej poziomej naprężenia przy dalszym zagłębianiu ściany poniżej poziomu czujnika. W przypadku ścian trapezoidalnych zaobserwowano częściową re-mobilizację składowej poziomej naprężenia, która była tym większa im większy był kąt nachylenia powierzchni ściany. Dla ścian trapezoidalnych większe były również poziomy naprężen poziomych w gruncie oraz naprężeń normalnych działających na powierzchnię ściany.

Cyfrowa analiza obrazu metodą PIV (ang. Particle Image Velocimetry) zastosowano do analizy pól przemieszczeń oraz odkształceń w gruncie podczas instalacji pali. Mapy poziomych oraz pionowych konturów przemieszczeń oraz odkształceń objętościowych i ścinających przeanalizowano w zależności od zagłębienia pala podczas instalacji. Strefa naruszenia gruntu podczas instalacji modelu jest zdecydowanie większa w przypadku ścian trapezoidalnych. Przemieszczenia poziome w pobliżu powierzchni bocznej modelu są większe dla ścian trapezoidalnych niż ściany prostej, a w okolicy podstawy zaobserwowano tendencję odwrotną.

Analizę numeryczną pali stożkowych wykonano Metodą Elementów Skończonych (MES) i Metodą Analizy Granicznej (MAG). Analiza MES posłużyła do oceny krzywych obciążenie-

osiadanie, a MAG do oszacowania obciążenia granicznego i mechanizmu zniszczenia. Analizy numeryczne wykazały istotny wpływ kąta nachylenia powierzchni ściany na nośność graniczną. Rezultaty analizy numerycznej zdecydowanie nie doszacowały nośności pali ze względu na istotny wpływ efektów instalacji. Efekty te są tym większe im większy jest kąt nachylenia powierzchni ściany. Mimo, że analiza dotyczyła płaskiego stanu odkształcenia, to jej wyniki można jakościowo ekstrapolować na stan osiowosymetryczny.

Słowa kluczowe : Badania modelowe, wirówka geotechniczna, efekty instalacji pala, mobilizacja naprężeń, przemieszczenia gruntu