

Określanie oporu pobocznic i podstawy pała metodą badań ekstensometrycznych

**Mgr inż. Paweł Głowacki, mgr inż. Andrzej Waszkiewicz
Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Zakład Fundamentowania**

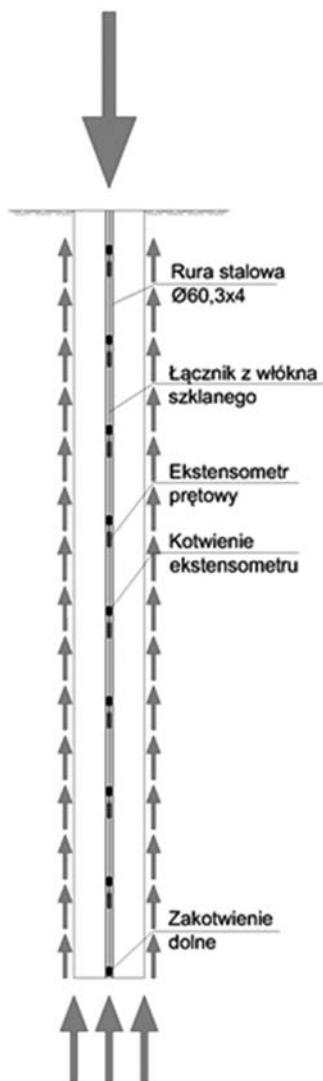
Ekstensometr to czujnik służący do pomiaru odkształcenia liniowego pomiędzy dwoma punktami. Czujniki ekstensometryczne montuje się zwykle na prętach, tworząc łańcuch, którego skrajny punkt jest zakotwiony w otworze, a kolejne czujniki również są zakotwione w tym samym otworze. Przesunięcie wzdłuż osi otworu między kolejnymi czujnikami jest rejestrowane przez pomiar ruchu górnej części pręta względem głowicy referencyjnej. Ekstensometry prętowe są używane do monitorowania przemieszczeń skał i gruntów, osiadania i zagłębienia fundamentów, relaksacji lub osiadania skał wokół tuneli, szyn, jaskiń i przyczółków. Można również wykorzystać je do określenia oporów pobocznic i podstawy pała podczas próbnego obciążenia statycznego [7].

W trzonie pała przeznaczonego do badania umieszcza się rurę stalową o średnicy $60,3 \times 4$ mm. Przed badaniem nośności pała w rurze zamontowany jest zestaw ekstensometryczny (rys. 1) złożony z ośmiu ekstensometrów prętowych o zakresie pomiaru 12,5 mm oraz dolnego zakotwienia. Ekstensometry połączone są za pomocą prętów z włókna szklanego i zakotwione za pomocą pneumatycznych kotew na określonych głębokościach. Należy dodać, że w rurze o średnicy $60,3 \times 4$ mm można

zamontować maksymalnie osiem ekstensometrów i kotwę dolną ze względu na możliwość zmieszczenia w niej przewodów pneumatycznych i kabli zasilających każdy ekstensometr oddzielnie oraz możliwości prawidłowego kotwienia elementów zastosowanego zestawu pomiarowego (rys. 2, 3).

Pierwszym przykładem wykorzystania układu ekstensometrycznego do określenia odkształceń trzonu pała jest badanie pała o średnicy 1 000 mm, długości 16 m, z podstawą poszerzoną przez iniekcję strumieniową. Wzdłuż pobocznic badanego pała występowały warstwy gruntów spoistych oraz niespoistych, podstawa znajdowała się w warstwie piasków drobnych. Badanie zaprojektowano tak, aby osiągnąć nośność graniczną pała lub wartość zbliżoną. Pierwsze dwa etapy badania nośności przeprowadzono zgodnie z PN-83/B-02482 Nośność pali i fundamentów palowych, trzeci, dodatkowy, etap badania przeprowadzono do uzyskania obciążenia rzędu $2,5 \cdot N_t$, gdzie N_t jest nośnością pała bez poszerzonej podstawy [10].

Po wykonaniu odczytu zerowego przystąpiono do realizacji obciążenia pała. Odczyty wskazań poszczególnych czujników były rejestrowane automatycznie, co minutę, za pomocą elektronicznego rejestratora. Umożliwiało to bieżącą kontrolę



Rys. 1. Schemat układu ekstensometrycznego



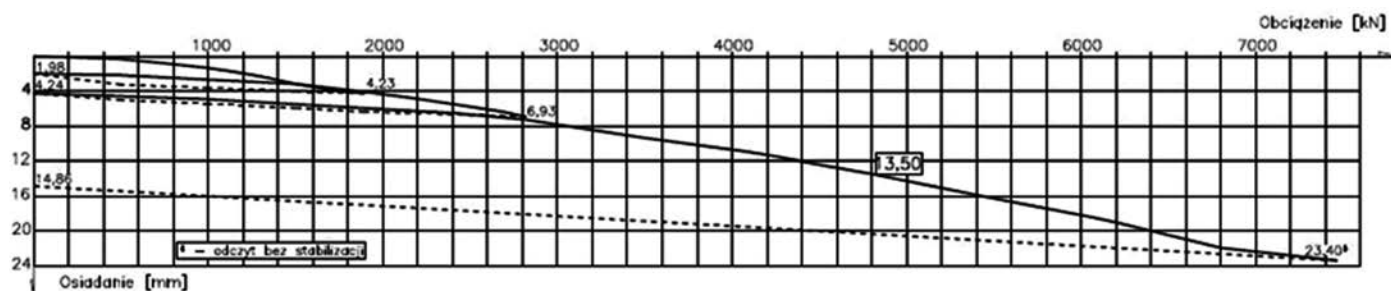
Rys. 2. Podłączanie układu ekstensometrycznego



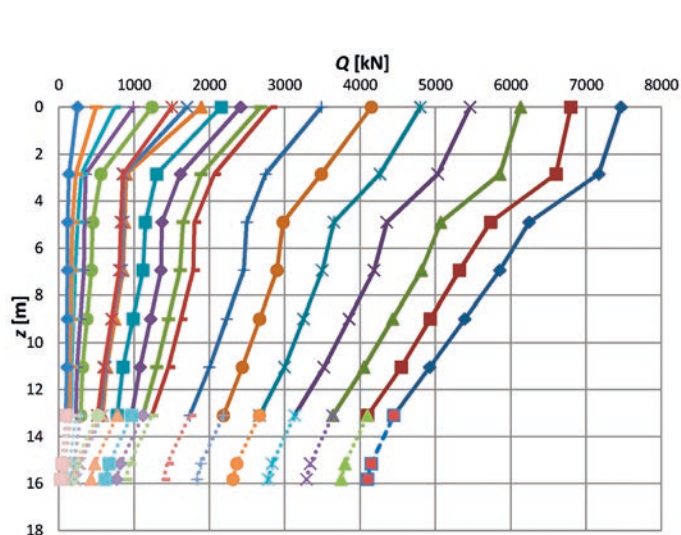
Rys. 3. Głowica badanego pala, widoczna wiązka przewodów zasilających i pneumatycznych oraz uchwyt do wstępnego ustawienia ekstensometrów

zachowania się pala pod obciążeniem. Wzrost obciążenia powodował zmiany długości jego trzonu. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano rozkład sił w poszczególnych przekrojach trzonu badanego pala. Uzyskano je z zarejestrowanych pomiarów odkształceń pomnożonych przez wartość modułu odkształcenia materiału pala, to jest betonu zbrojonego. Dla każdego stopnia obciążenia obliczono naprężenia w trzonach pali w 8 przekrojach. Na tej podstawie obliczono siły pionowe występujące w każdym z 8 odcinków pala jako iloczyn naprężenia i pola przekroju pala. Znając dystrybucję sił w trzonie pala, można dla danego obciążenia wyznaczyć różnicę między siłą działającą na głowicę pala a sumą sił w poszczególnych odcinkach trzonu pala. Różnica ta odpowiada wartości siły oporu podłoża pod podstawą pala. Po odjęciu tej siły od wartości obciążenia otrzymamy sumaryczne tarcie gruntu na powierzchni trzonu pala – opór pobocznic. Różnica siły w danym odcinku trzonu pala w stosunku do siły w odcinku sąsiednim odpowiada tarcu na pobocznicę pala. Tak więc rozkład sił w palu obrazuje opory występujące na pobocznicę pala i pod jego podstawą. Dzięki tej analizie możemy uzyskać z krzywej osiadania pala rozkład oporów pobocznic i podstawy pala, których suma jest obciążeniem pala przyłożonym do jego głowicy [3].

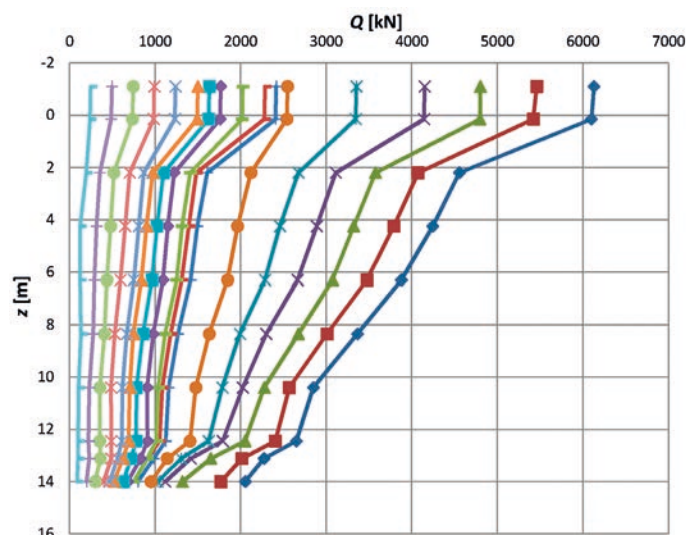
Z krzywej osiadania (rys. 4) wynika, że nie osiągnięto obciążenia zbliżonego do nośności granicznej pala. Przy obciążeniach do około 2 000 kN (rys. 5) udział podstawy pala w przenoszeniu obciążeń jest mały. Zwiększa się on stopniowo, aby przy wartości około 2 500 kN przekroczyć 50%. Przy największym obciążeniu, wynoszącym 7 500 kN, jest on jeszcze większy. W przypadku pali wielkośrednicowych o dużej smukłości ($L/D = 16$) opory podstawy są zwykle mniejsze od oporów pobocznic. Z wykresu (rys. 6) wynika, że opory gruntu pod podstawą pala zaczynają szybko przyrastać już przy niewielkim osiadaniu około 4 mm. Dalszy przyrost oporów jest w przybliżeniu proporcjonalny, aż do uzyskania siły maksymalnej. Tak szybkie przyrosty oporów podstawy świadczą o dużej nośności podłoża, co wynika z obecności pod podstawą cementogruntu [8, 9]. Opory pobocznic rosną szybko, po czym przy osiadaniu 8 ÷ 10 mm krzywa się zagina i przyrosty stają się większe. W efekcie przy osiadaniu 15 mm udział oporów podstawy pala osiąga 50%. Zwykle na krzywych przedstawiających rozkład sił w trzonie pala można zaobserwować, że od pewnej wartości obciążenia ich nachylenie zmienia się niewiele. W kolejnych stopniach obciążenia nie następuje już przyrost oporów na pobocznicę, a jedynie wzrasta opór podstawy. Przyrosty oporów



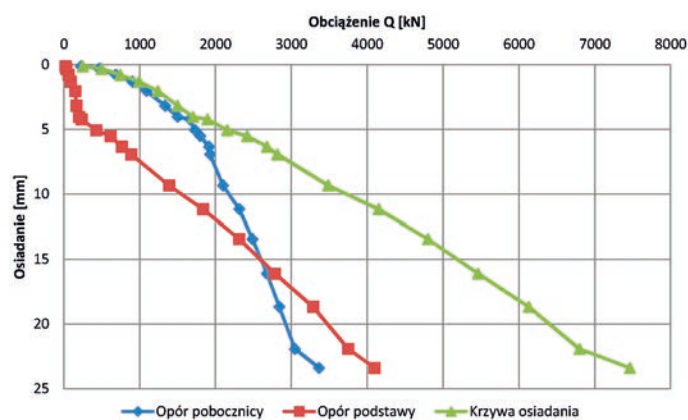
Rys. 4. Krzywa osiadania pala



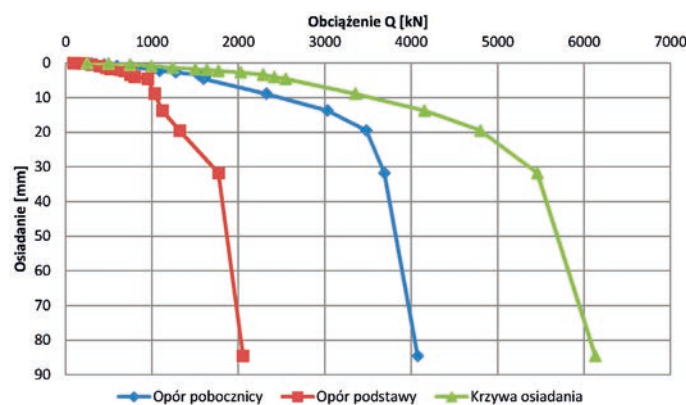
Rys. 5. Dystrybucja sił w trzonie pala



Rys. 7. Dystrybucja sił w trzonie badanego pala



Rys. 6. Rozkład oporów w badanym palu



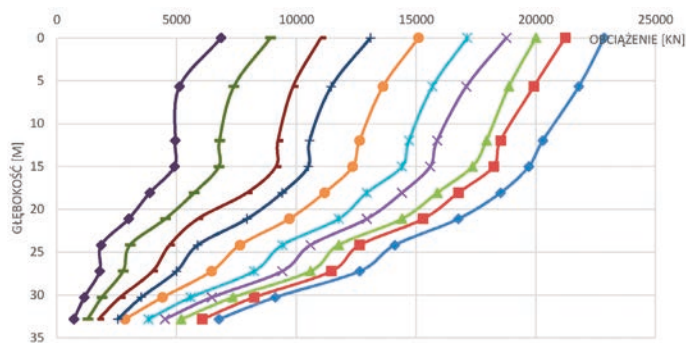
Rys. 8. Rozkład oporów w badanym palu

podstawy wraz z wzrostem obciążenia są w przybliżeniu proporcjonalne, co oznacza, że nie nastąpiło jeszcze wyczerpanie możliwości podstawy w przenoszeniu obciążeń.

Kolejny przykład zastosowania układu ekstensometrycznego podczas badania nośności pala to próbne obciążenie pala o średnicy 1 000 mm i długości 14 m. Jest to pał z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej. Wzdłuż pobocznic występowały na przemian grunty spoiste i niespoiste. W rejonie podstawy pala zalegały gliny pylaste w stanie twardoplastycznym. Grunty niespoiste były w stanie średniozagęszczonym, a niżej zagęszczonym. Natomiast grunty spoiste były w stanie twardoplastycznym, a niżej półzwardłym. Badanie wykonano w trzech etapach

– pierwsze dwa etapy zgodnie z PN-83/B-02482, trzeci etap do osiągnięcia nośności granicznej pala [1].

Z wykresu (rys. 7, 8) wynika, że opory gruntu pod podstawą pala przyrastają wolno. Rozkład sił wzdłuż trzonu pala przy danych obciążeniach jest w miarę równomierny. Opory podstawy są znacznie mniejsze niż opory pobocznic [4]. Co prawda w początkowej fazie obciążenia, przy małych osiadanach, przyrosty oporów podstawy są proporcjonalne, ale już przy niewielkim obciążeniu około 800 kN następują znacznie mniejsze przyrosty oporów wraz z wzrostem obciążenia. W efekcie, przy obciążeniu bliskim granicznemu, opory podstawy pala wynoszą jedynie około 2 000 kN, podczas gdy opory pobocznic osiągną



Rys. 9. Dystrybucja sił w trzonie badanej baret

4 300 kN, a zatem są dużo wyższe. Świadczy to o tym, że podłoże pod podstawą trzonu jest słabe.

Ostatni przykład zastosowania ekstensometrów podczas badań nośności to próbne statyczne obciążenie baret na budowie wysokościowca Varso Tower w Warszawie. Badano nośność baret o wymiarach $0,8 \times 2,8$ m i głębokości 34,8 m. Pod podstawą baret przeprowadzono zabieg dwukrotnej iniekcji podłoża według rozwiązania IBDiM. Wzdłuż pobocznic występowały na przemian grunty spoiste i niespoiste. W rejonie podstawy baret zalegały piaski drobne i pylaste o $I_D \geq 0,80$. Zastosowano układ z 8 ekstensometrami prętowymi o zakresie pomiaru 12,5 mm każdy. Całkowita długość układu wynosi około 34 m. Maksymalna siła obciążająca podczas badania wyniosła 22,8 MN. Całkowite osiadanie baret wyniosło 8,73 mm, osiadanie trwałe wyniosło 2,79 mm [2].

Na podstawie badań ekstensometrycznych określono udział pobocznic baret w przeniesieniu obciążenia na około 16,1 MN oraz podstawy na około 6,7 MN (rys. 9). Wynika stąd, że osiadanie baret było jeszcze za małe, by zmobilizować pełny opór podstawy.

Pomiar odkształceń trzonów pali lub baret za pomocą układów ekstensometrycznych umożliwia określenie wartości sił przekazywanych na grunt przez pobocznice i podstawę pala. Poznanie tego rozkładu sił jest pomocne przy obliczaniu nośności pali, szczególnie przy wprowadzaniu nowych rozwiązań

technologicznych w dziedzinie głębokiego fundamentowania. Znajomość rozkładu oporów na pobocznicę i w podstawie pala jest bardzo przydatna do wyznaczania sztywności osiowej pali, dokładniejszego określenia modułów reakcji pionowych gruntu K_z [5, 6]. Dzięki temu można precyzyjnie określić podpory sprężyste k_z w węzłach modelu pali. Umożliwia także wprowadzenie zmiennych wartości podpór sprężystych wzdłuż pobocznic i w podstawie w zależności od obciążenia. Ma to szczególne znaczenie przy modelowaniu numerycznym MES fundamentów zespolonych płytowo-palowych dla dużych obiektów posadowionych w skomplikowanych warunkach gruntowych.

LITERATURA

1. Głowacki P.: Sprawozdanie z badań nr 70/TF/11. IBDiM, Warszawa, 2011.
2. Głowacki P.: Sprawozdanie z badań nr Ch02/TF/17, IBDiM Warszawa, 2017.
3. Gmyz K.: Sprawozdanie z badań dystrybucji sił nr 1/11. IBDiM, Warszawa, 2011.
4. Gmyz K.: Sprawozdanie z badań dystrybucji sił nr 3/11. IBDiM, Warszawa, 2011.
5. Kacprzak G., Bodus S., Kłosiński B., Rychlewski P.: Raport dotyczący sztywności baret dla inwestycji Varso Tower w Warszawie, przy ulicy Chmielnej 71, WARBUD/IBDiM, Warszawa, 2018.
6. Kacprzak G., Kłosiński B., Szymankiewicz Cz., Rychlewski P., Budus S., Głowacki P., Petyniak D.: Największe próbne obciążenie baret w Polsce, Inżynieria i Budownictwo 2/2019.
7. Krasiński A., Sieńko R. Wykorzystanie pomiaru pionowego rozkładu siły w palu w interpretacji testów statycznych, Magazyn Autostrady 11/2010
8. Szymankiewicz Cz.: Poszerzanie podstaw pali metodą iniekcji strumieniowej, Inżynieria i Budownictwo 3/2013.
9. Szymankiewicz Cz., Kłosiński B., Petyniak D., Kraszewski C., Gmyz K.: Analiza pracy pali z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej w ośrodku gruntowym, IBDiM Warszawa, 2013.
10. Waszkiewicz A.: Sprawozdanie z badań nr 77/TF/11. IBDiM, Warszawa, 2011.