

Dr hab. inż. Jacek Pieczyrak

Meszna 28.01.2021

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Kreczmar  
pt.: „*Analiza układu: podłoże – pal obciążony siłą poziomą z uwzględnieniem zmiany sztywności układu*”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Kreczmar pt. „*Analiza układu: podłoże – pal obciążony siłą poziomą z uwzględnieniem zmiany sztywności układu*” wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej – Pana dr hab. inż. Marcina Staniek, prof. PŚ, pismo z dnia 21 grudnia 2020 roku.

### 2. Przedmiot i ogólna charakterystyka treści rozprawy

Wykorzystanie pali fundamentowych do pośredniego posadowienia budowli staje się coraz bardziej powszechne. Dzieje się tak, ponieważ, w wyniku szybkiego rozwoju cywilizacji i związanego z nią przemysłu, dokuczliwie skurczyły się tereny przydatne do bezpośredniego posadowienia budowli. Ponadto coraz częściej obiekty budowlane wykonujemy w głębokich wykopach, usytuowanych w ścisłej zabudowie miejskiej. Ubezpieczone ściany takich wykopów, niejednokrotnie formowane z pali, przenoszą bardzo duże obciążenia poziome.

Pale fundamentowe mogą przenosić obciążenie zarówno pionowe (osiowe) jak i poziome. Niestety dotychczasowe zainteresowania badaczy, szczególnie polskich, głównie dotyczyły pali obciążonych osiowo, czyli siłami pionowymi. W przypadku występowania obciążeń poziomych pale pochylano tworząc układy kozłowe. W efekcie obciążająca fundament siła pozioma w palach kozłowych występowała, jako siła osiowa. Jednakże takie rozwiązanie w przypadku dużych wartości sił poziomych i małych wartości sił pionowych nie jest już wystarczające.

Mechanizm przekazywania obciążenia z pala pionowego, obciążonego osiowo, na podłoże gruntowe jest znacznie prostszy niż mechanizm zachowania się układu pal-podłoże gruntowe w przypadku obciążenia poziomego.

Podjęcie badań nad zachowaniem układu pal-podłoże, obciążonego siłą poziomą, jest zadaniem trudnym, ale ważnym i oczekiwanym. Tak, więc podjęty przez doktorantkę wysiłek zasługuje na stosowne docenienie.

W recenzowanej pracy doktorantka z powodzeniem zmierzyła się ze złożonym zadaniem poznania zachowania się zginanego pala o przekroju kołowym usztywnionego (zbrojonego) profilem stalowym z uwzględnieniem zmiany jego sztywności oraz nieliniowej zmiany oporu gruntu wraz z głębokością.

Analizę zachowania się układu pal-podłoże gruntowe autorka oparła na wynikach własnych badań terenowych i laboratoryjnych.

### 3. Zawartość rozprawy

Praca składa się z siedmiu rozdziałów i łącznie ze spisem literatury liczy 210 stron. Nienumerowany wykaz literatury obejmuje 157 pozycji bibliograficznych (z czego 130 głównie w języku angielskim) i 20 norm, cytowanych w tekście pracy. Najobszerniejsze są rozdziały: drugi - przedstawiony na 52 stronach i rozdział szósty – przedstawiony na 53 stronach.

Do pracy dołączony jest spis rysunków (6 stron), spis tablic (1 strona) i sześć załączników przedstawionych na 45 stronach. Łączna objętość pracy wynosi 262 strony. Załączniki, zapisane na płycie CD, dołączone zostały do drukowanego tekstu pracy.

Rysunki i wykresy zamieszczone w pracy są czytelne i zostały wykonane przez doktorantkę z dużą starannością.

*W rozdziale pierwszym* „Wprowadzenie” (liczącym 5 stron) autorka przedstawiła ogólne wprowadzenie do tematu pracy oraz sformułowała cel i zakres pracy.

*W obszernym rozdziale drugim* „Przegląd metod obliczania pali obciążonych siłą poziomą” (liczącym 52 strony) doktorantka dokonała szczegółowej analizy dobrze wybranych pozycji literatury naukowo-technicznej, istotnych z punktu widzenia celu pracy. Przegląd obejmował metody oparte na teorii reakcji podłoża i kontinuum. Szczegółowej analizie poddano metody Bromsa, krzywych  $p-y$ , Koseckiego, Poulosa i polskiej normy PN-B-02482:1983. Oceniany dorobek naukowy i stosowane rozwiązania praktyczne jak i wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych głównie odnoszą się do prac zagranicznych. W pracach tych rozważano pale żelbetowe zbrojone kołkami.

Doktorantka, powołując się na istniejącą polską praktykę inżynierską i własne doświadczenie zawodowe, wskazuje, że w wielu przypadkach trudno jest wprowadzić zbrojenie koszowe do świeżo uformowanego w gruncie pala betonowego. W takich przypadkach praktyka inżynierska wymusiła zastosowanie zbrojenia sztywnego (profilowego). Poza tym, zauważa doktorantka, zbrojenie koszowe jest droższe od zbrojenia profilowego.

W zakończeniu rozdziału autorka formułuje cel i zakres swojej pracy doktorskiej. Analizowana będzie zmiana sztywności pala poddanego działaniu rosnącej siły poziomej z uwzględnieniem nieliniowego zachowania gruntu w wyniku jego uplastycznienia. W pracy rozważane będzie zachowanie się pali zbrojonych wyłącznie zbrojeniem profilowym.

*W rozdziale trzecim* „Badania terenowe” (21 stron) przedstawiono szczegółowy opis badanych pali, stanowisk badawczych i budowy podłoża gruntowego w obrębie którego wykonane zostały próbne obciążenia pali.

Badanie próbnego obciążenia narastającą siłą poziomą prowadzono metodą stałych stopni obciążenia, krokami, co 1 MPa. Badaniu poddano dwa pale CFA o średnicy 0,4 m i długości 5,0 m (seria T/A) oraz dwa pale FDP o średnicy 0,5 m i długości 10,0 m (seria T/B). Pale CFA (seria T/A) były zbrojone profilami IPE 100 o długości 5,0 m, a pale FDP (seria T/B) były zbrojone profilami IPE 120 o długości 6,0 m. Stanowiska badawcze zaprojektowała doktorantka, ona też przeprowadziła badania próbnego obciążenia pali.

Badania próbnych poziomych obciążeń pali doktorantka przeprowadziła na konkretnych budowach. Badania T/A zostały przeprowadzone na budowie hali maga-

zynowej Johnson Controls Sp. Geowizjer w Katowicach, a badania T/B przeprowadzono na budowie budynków mieszkalno-handlowo-usługowych w Rzeszowie. W obu przypadkach, w rejonie badanych pali, wykonane były wiercenia badawcze. Ponadto doktorantka wykonała dodatkowe wiercenia badawcze w celu pobrania próbek gruntu do badań laboratoryjnych.

Do pomiaru odkształceń pali serii T/A wykorzystano tensometry zainstalowane na różnych poziomach profili zbrojących. Ponadto do pomiaru przemieszczenia głowicy pała wykorzystano elektroniczne czujniki cyfrowe i czujniki indukcyjne. Wyniki pomiarów odkształceń badanych pali przedstawiono na wykresach.

Do pomiaru odkształceń pali serii T/B wykorzystano inklinometry. Rura inklinometryczna, o długości  $3,0+3,0=6,0$  m i średnicy wewnętrznej 5,1 cm, została zamontowana do profilowego zbrojenia pała. Do pomiaru przemieszczenia głowicy pała wykorzystano elektroniczne czujniki cyfrowe. Wyniki pomiarów odkształceń badanych pali przedstawiono na wykresach.

*W rozdziale czwartym* „Badania laboratoryjne” (16 stron) przedstawiono laboratoryjne badanie odkształceń pali betonowych obciążonych siłami poprzecznymi do ich osi podłużnej. Badaniu poddano takie same pale jak pale badane w ramach serii T/A (zachowano tu średnicę i cechy materiałowe pali z badań terenowych), jednakże bez otoczenia gruntowego.

Pracująca długość badanych w laboratorium pali wynosiła 2,75 m, a długość ich sztywnego utwierdzenia 0,6 m. Wartości te doktorantka przyjęła na podstawie wyników ugięcia pali z badań terenowych (szkoda, że tej informacji nie wyartykułowała). Była to więc zmodyfikowana symulacja badań przeprowadzonych w ramach serii T/A. Jej celem była obserwacja rozwoju zarysowań pojawiających się wraz ze wzrostem obciążenia zginającego pał.

Udział stalowego profilu zbrojącego pał w ograniczeniu jego odkształceń był niewielki. Sztywność na zginania EI profilu stalowego, zbrojącego pał, wynosiła zaledwie  $0,34 \text{ MNm}^2$  wobec sztywności na zginanie przekroju betonowego wynoszącego  $42,49 \text{ MNm}^2$ . Przy tak niewielkim udziale zbrojenia profilowego w ogólnej sztywności pała zbrojonego (0,8 %) rysy pojawiły się już przy niewielkim obciążeniu i ostatecznie osiągnęły dość znaczne rozwarcie, wynoszące nawet 3,5 mm.

W przypadku pała zanurzonego w ośrodku gruntowym, ugięcie wywołane działaniem obciążenia poziomego (prostopadłego do jego osi podłużnej) będą mniejsze od odkształceń pali badanych bez otoczenia gruntowego (czyli tak jak to miało miejsce w przypadku badań laboratoryjnych L/C). Oznacza to, że zarysowania pali pracujących w ośrodku gruntowym będą mniejsze od tych, które zaobserwowano w badaniach L/C.

*W rozdziale piątym* „Analizy teoretyczne z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych pali” (32 strony) zawarto wnikliwą analizę zachowania betonu tworzącego pał pracujący na zginanie. W szczególności określono nośność na zginanie  $M_R$ , moment rysujący  $M_{cr}$  i kształt linii ugięcia. Uzyskane wyniki wykorzystano do kalibracji modeli numerycznych pali, przedstawionych w rozdziale szóstym (Analizy interakcji pał-podłoże gruntowe).

Celem tych analiz była ocena możliwości zastosowania podejścia teoretycznego do przewidywania zachowania pali zbrojonych profilami stalowymi, poddanych obciążeniu poziomemu.

*W rozdziale szóstym* „Analiza interakcji pal - podłoże gruntowe” (53 strony) dokonano analizy interakcji pal - podłoże gruntowe dwoma metodami, tj. metodą elementów skończonych (MES) - wykorzystując program Z-Soil2011 v11.15 i metodą różnic skończonych (MRS) – wykorzystując program GW\_Pal\_MRS. Obie metody umożliwiały uwzględnienie nieliniowego zachowania zarówno materiału pala jak i gruntu.

Doktorantka wykorzystując własne badania L/C stworzyła model numeryczny w programie Z-Soil, odpowiadający warunkom pracy pala bez otoczenia gruntowego. Pozwoliło jej to określić wytrzymałość betonu na rozciąganie. Następnie stworzyła model przestrzenny pal – podłoże gruntowe (program Z-Soil) odwzorowujący badania terenowe T/A, jednocześnie dokonując kalibracji parametrów gruntu. Poczynione ustalenia (tj. wartości parametrów wytrzymałościowych betonu i gruntu), zostały wykorzystane w modelu prętowym MRS.

W procesie identyfikacji numerycznej, jako miarę ścisłości dopasowania krzywej teoretycznej do krzywej doświadczalnej zastosowano zmodyfikowany współczynnik determinacji  $R^2$ .

Dużą zgodność wyników badań teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych uzyskano dla pali niezarysowanych. Wraz ze wzrostem zarysowań wyniki te rozbiegały się (i sztywność pala malała). Spostrzeżenie to prowadzi do wniosku, że udział sztywności zbrojenia w ogólnej sztywności pala ma duże znaczenie.

Do sporządzenia wykresów odkształceń pala  $y$  wzdłuż jego długości, przedstawionych na rys. 6-6, wykorzystano wyniki odpowiednich badań, które zostały raportowane w załącznikach pracy.

*W rozdziale siódmym* „Zakończenie” (5 stron) zawarto podsumowanie i wnioski oraz przedstawiono perspektywy dalszych badań.

Autorka formułuje 9 obszernych wniosków, słusznie konkludując, że dla uzyskania pełniejszego rozwiązania, omawianego w doktoracie zadania, duże znaczenie będą miały kolejne dobrze udokumentowane badania.

Przedstawione w 6-ciu punktach zadania, którymi doktorantka zamierza zająć się w przyszłości, dobrze świadczą o jej naukowo dojrzałym zaangażowaniu w wykonywaną pracę.

#### **4. Uwagi dyskusyjne i krytyczne**

Praca napisana została z dużą starannością, poprawnym językiem polskim. Poza nielicznymi przypadkami, nie można mieć większych zastrzeżeń do werbalnej strony pracy. Do paru przykładowych uchybień, które dostrzegłem w pracy, zaliczają się:

- s. 37, na rys. 2-10 wielkość „f” nie jest zgodna z opisem podanym na s. 36 (pomięnięto wielkość 1,5D);
- s. 47, rys. 2-21, brak wyjaśnienia co to jest „d<sub>T</sub>”;
- s. 48, brak tablicy 3.4;
- s. 68 i 69, sztywność zginania EI wyrażamy w MNm<sup>2</sup> a nie w MN/m<sup>2</sup>;
- s.77, rys. 3-4, podana na rysunku długość sztywnej belki (1) wynosi 2,0 m, natomiast w opisie na s. 76 podano ją jako 1,6 m;

- s. 90, rys. 3-20, legenda odnosząca się do krzywej  $P=34,5$  podana jest w złej kolejności;
- s. 97, rys. 4-7a, legenda odnosi się do krzywej  $P=22,0$  kN natomiast na wykresie jest krzywa  $P=21,0$  kN;
- s. 93, w przedstawionym tu opisie występuje  $D=0,4$  m i IPE 100, natomiast na rys. 4-1 pokazanym na s. 94 podano  $D=0,5$  m i IPE 120;
- s. 103, mówiąc o tensometrze dolnym warto dodać, że założony był w strefie ściskanej;
- s. 120, formułowane wnioski mówią, że uplastycznienie stali rozpoczyna się gdy moment zginający pał przekroczy wartość 40 kNm. Ta informacja jest niewystarczająca i powinna być uzupełniona o wartości naprężeń, jakie ten moment wywołuje zarówno w profilu stalowym jak i w betonie.
- w wielu miejscach pracy doktorantka pisze o przemieszczeniach pali tymczasem w ramach przeprowadzanych badań nie były one przemieszczane, lecz odkształcane.

Model przestrzenny podłoża gruntowego rozważany w programie Z-Soil (s. 157) był bardziej wyidealizowany (uproszczony) niż złożona budowa gruntu w obrębie, którego realizowano badania terenowe T/A (s. 75, rys. 3-3). Oznacza to, że identyfikacja parametryczna przeprowadzona była w odniesieniu do nieco innego wzorca.

Analiza interakcji pał-podłoże gruntowe jest bardzo złożonym zagadnieniem, bowiem zależy od wielu współzależnych czynników, co utrudnia (a nawet uniemożliwia) ich niezależną identyfikację. W tym stanie rzeczy doktorantka analizę interakcji pał-podłoże gruntowe przeprowadziła dla globalnej odpowiedzi zachowania się pala i współpracującego z nim gruntu, czyli dla wyników badań terenowych próbnego obciążenia pali obciążonych siłą poziomą. W wyniku tej identyfikacji uzyskano zastanawiająco dużą wartość modułu odkształcenia pyłu ilasto-piaszczystego  $E=70$  MPa (s. 158, tablica 6-3).

W przypadku badań inklinometrycznych brakuje mi refleksyjnej uwagi doktorantki na temat wpływu rury inklinometrycznej na sztywność pala. Badania inklinometryczne są badaniami inwazyjnymi. W miejsce betonu pojawia się pusta przestrzeń zamknięta w rurze inklinometrycznej, niesymetrycznie umiejscowiona w pału. Ma to wpływ na wytrzymałość i sztywność pala. Zarówno wówczas, gdy kolumna inklinometryczna znajdzie się w strefie ściskanej jak i w rozciąganej. W efekcie wyniki badań próbnego obciążenia pali, w których zainstalowano kolumny inklinometryczne, obarczone są błędami systematycznymi, tym większymi im mniejsza jest średnica pala.

W przypadku złożonych analiz nie sposób obejść się bez pomocy ze strony programów komputerowych. Jednakże ich użycie jest ograniczone do tych modeli materiałowych, które oferuje dany program. Z drugiej strony należy brać pod uwagę, że w przypadku zbyt wyrafinowanych, „dokładnych” modeli należy się zmierzyć z większą liczbą parametrów i zwykle dużymi trudnościami w ich wyznaczeniu.



Badania laboratoryjne L/C dostarczyłyby dodatkowej pozytywnej informacji gdyby w ich realizacji uwzględniono wpływ sztywności profilu stalowego na rozwój stanu zarysowania pala zbrojonego. Zwiększony profil stalowy, zwiększałby sztywność pala, a tym samym zmniejszałby jego ugięcie, a więc i zarysowanie. W przypadku agresywnego środowiska takie zmniejszenie rozwarcia rys miałooby istotne znaczenie dla trwałości pali. Ponadto przeprowadzone przez doktorantkę analizy wykazały, że wyniki identyfikacji parametrycznej wyraźnie zależą od uwzględnienia zarysowań pala.

Nauka pełni rolę służebną w stosunku do praktyki inżynierskiej. W myśl tej zasady należałoby oczekiwać jeszcze odpowiedzi na pytanie czy pale obciążone siłą poziomą należy zbroić na pełną ich długość, czy może wystarczy zbrojenie krótsze. Na przykład czy wystarczyłoby zbroić pal tylko na jego długości sprężystej  $h_s$ . Pytanie to jest istotne, bowiem jak wykazuje praktyka inżynierska niejednokrotnie trudno jest pogrążyć zbrojenie (nawet profilowe) w świeżo utworzonym palu betonowym. W takich przypadkach zachodzi potrzeba odcięcia niepogrążonej w świeżym betonie pala, wystającej części zbrojenia. Powyższa uwaga nie stanowi zarzutu, co do zakresu recenzowanej rozprawy, lecz jest zachętą do przeprowadzenia tych badań w przyszłości.

W ramach zachęty do dalszych badań na uwagę zasługuje zasada przyjęcia głębokości krytycznej, bowiem jak wynika z ustaleń doktorantki, funkcjonująca w literaturze zasada Krasieńskiego nie spełniła się.

## **5. Ocena i wniosek końcowy**

Asumpt do podjęcia tego tematu pracy niewątpliwie dała praktyka inżynierska. Projektowanie pali obciążonych przeważającymi siłami poziomymi jest trudne i uciążliwe z powodu braku wystarczająco przyjaznej metody obliczeń. Tak więc każdy wysiłek zmierzający do poprawy istniejącej sytuacji w dziedzinie projektowania pali obciążonych dużymi siłami poziomymi jest bardzo cenny.

Doktoranta dokonało wnikliwego i rozległego przeglądu literatury przedmiotu, w przemyślany sposób zaprojektowała i rzetelnie wykonała nowoczesne badania laboratoryjne i polowe. W celu rozwiązania postawionego sobie zadania naukowego, doktorantka nawiązała owocną współpracę z prof. G. Wandzikiem – specjalistą od żelbetu. Na zakończenie, podsumowując swoje bogate badania i wszechstronne analizy, doktorantka dokonała krytycznej ich oceny.

W stosunku do treści pracy i metod badawczych nie mam uwag krytycznych. Zamieszczone w opinii uwagi krytyczne i wykazane uchybienia, nie podważają wartości pracy, którymi są: poprawnie postawione zadanie, właściwie zaprojektowane i wykonane badania, właściwie dobrane metody rozwiązania postawionych zadań, szczegółowe analizy, uzyskanie wartościowych wyników.

Opiniowana praca dobrze świadczy o dojrzałości doktorantki do samodzielnego podejmowania i rozwiązywania zdań naukowych.

Z praktycznego punktu widzenia praca stanowi ważny przyczynek do projektowania pali obciążonych przeważającymi siłami poziomymi.

Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Kreczmar pt. „*Analiza układu: podłoże – pal obciążony siłą poziomą z uwzględnieniem zmiany sztywności układu*” spełnia warunki i wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2020, poz. 85 z późn. zm.) z dnia 20 stycznia 2020 roku.

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę, wnioskuję o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej oraz dopuszczenie Pani mgr inż. Magdaleny Kreczmar do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Będąc przekonany, że praca doktorska Pani Magdaleny Kreczmar zasługuje na wyróżnienie, zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej z prośbą o rozważenie takiej możliwości.

