

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz  
Katedra Geoinżynierii  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie

Warszawa, 05.06.2019 r.

## R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Nepelskiego  
pt.

**„Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu  
gruntowym”**

Recenzję opracowałem na zlecenie prof. dr hab. inż. Bogusława Szmygina, Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej (pismo WB-708/2018 z dnia 05.04.2019 r.), zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 06.03.2019 r., w oparciu o otrzymany egzemplarz ww. rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Ewa Błazik-Borowa, prof. Politechniki Lubelskiej, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Tomasz Lipecki, prof. Politechniki Lubelskiej.

### **1. Uwagi ogólne**

Budownictwo w Polsce, szczególnie w ostatnich piętnastu latach, przeżywa intensywny rozwój przede wszystkim w zakresie budowy i modernizacji obiektów w aglomeracjach miejskich oraz rozbudowy infrastruktury drogowej, kolejowej, sanitarnej i energetycznej. Konieczność wejścia na tereny o mniej korzystnych warunkach geotechnicznych wymusza wprowadzanie udoskonalonych metod projektowania, nowych technologii wzmacniania podłoża gruntowego oraz nowych technologii budowy i monitorowania obiektów. Jednym z podłoży gruntowych zaliczanych do warunków geotechnicznych o dużej złożoności jest podłoże lessowe.

Należy wyrazić uznanie Doktorantowi, że podjął trudną tematykę oceny współpracy budowli z lessowym podłożem gruntowym przyjmując jako cel rozprawy określenie charakterystyk odkształceniowych i wytrzymałościowych analizowanych lessów oraz ocenę statycznej pracy budowli z uwzględnieniem odkształcalności podłoża gruntowego oraz jego wpływu na powstające w niej odkształcenia i siły wewnętrzne. Praca doktorska mgr. inż. Krzysztofa Nepelskiego rozszerza obszar badań nad współpracą obiektów budowlanych z odkształcalnym podłożem lessowym z uwzględnieniem jego sprężysto-plastycznego zachowaniem się pod obciążeniem.

### **2. Treść rozprawy doktorskiej**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Nepelskiego składa się z sześciu rozdziałów, wykazu podstawowych symboli i skrótów, zestawienia literatury o 163

pozycjach literatury, w tym 38 obcojęzycznych oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Całkowita objętość pracy wynosi 202 strony. Praca poza tekstem drukowanym zawiera 36 tabel i 146 rysunków. Rozprawa charakteryzuje się przejrzystym i dobrze skonstruowanym układem rozdziałów. Tematyka podrozdziałów nie jest zbyt szczegółowa i odpowiada strukturze i potrzebom pracy.

*Rozdział 1.* stanowi wstęp, w którym Doktorant podkreślił potrzebę uwzględnienia w projektowaniu budynków powiązania odkształcenia i sił wewnętrznych w konstrukcji z odkształceniami podłoża gruntowego. Wstęp zawiera także kluczowe stwierdzenie o konieczności lepszego poznania i analizy właściwości fizycznych i mechanicznych rozpatrywanych gruntów lessowych w badaniach laboratoryjnych i terenowych oraz potrzebie wykorzystania w ocenie współpracy budowli z podłożem analizy numerycznej z zastosowaniem odpowiedniego modelu gruntu. We wstępie jasno przedstawił cel i zakres pracy oraz kierunki podjętych badań.

W przeglądzie literatury (*rozdział 2.*) Doktorant przedstawił ogólną charakterystykę lessów występujących na terenie Polski. Szczególną uwagę poświęcił charakterystyce lessów Wyżyny Lubelskiej pod kątem ich właściwości fizycznych i mechanicznych oraz czynników warunkujących występowanie osiadań zapadowych. Szczególną uwagę zwrócono na zalety wykorzystania badań in situ (sondowań statycznych CPT i badań dylatometrycznych DMT) w wyznaczaniu parametrów mechanicznych. Zamieszczono wartości parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych lessów uzyskane z dotychczasowych badań CPT i DMT. Przedstawiono sposób obliczania płyt fundamentowych z wykorzystaniem współczynnika podatności podłoża oraz wybrane modele gruntu. Więcej uwagi zwrócono na model sprężysto-idealnie plastyczny z warunkiem zniszczenia Coulomba-Mohra oraz sprężysto-plastyczny model Cam-Clay. Dobór parametrów podłoża gruntowego do obliczeń przedstawiono na przykładzie wyznaczania parametrów ścisłości z badań edometrycznych oraz parametrów odkształceniowych z badań trójosiowych. Przy czym należy zwrócić, że pojęcie „ścisłość” powinno być wykorzystywane tylko w przypadku odkształcenia gruntu w jednowymiarowym stanie odkształcenia. W ramach modelowania współpracy budowli z podłożem przeanalizowano przykłady z literatury krajowej i zagranicznej dotyczące wielokondygnacyjnych budynków na uwarstwionym podłożu gruntowym, które Doktorant wykorzystał w opracowaniu założeń własnych analiz numerycznych.

*Rozdział 3.* zawiera wyniki badań własnych Doktoranta przeprowadzonych na lessach z Lublina i okolic. Wyniki badań wskazują, że lessy wykazują typowe zachowanie się gruntów „przejściowych” dla których ani stopień zagęszczenia  $I_D$  charakteryzujący stan gruntów niespoistych ani stopień plastyczności  $I_L$  charakteryzujący stan gruntów spoistych nie są dobrą miarą ich stanu. Na podstawie wyników badań Doktorant zaproponował podział lessowego podłoża na warstwy o podobnej sztywności na podstawie oporu stożka  $q_c$ . Analiza wyników sondowań statycznych pozwoliła na opracowanie zależności empirycznej umożliwiającej przeliczenie oporów stożka uzyskanego ze stożka mechanicznego na opory stożka elektrycznego.

*Rozdział 4.* zawiera wyniki badań własnych przeprowadzonych na dwóch obiektach doświadczalnych posadowionych na lessowym podłożu gruntowym. Pierwszy to budynek wielorodzinny o czterech kondygnacjach nadziemnych i jednej podziemnej o rozległej zabudowie przy ul. Cyprysowej w Lublinie. Budynek składa się z trzech oddylatowanych segmentów ułożonych w literę T. Obiekt zlokalizowany jest na niewielkiej skarpie, przez co każdy z segmentów jest obniżony o pół kondygnacji względem poprzedniego. Konstrukcja budynku jest mieszana żelbetowo-murowana. Ściany w części podziemnej wykonane są w technologii żelbetowej, natomiast w części nadziemnej jako murowane fragmentami żelbetowe. Budynek jest posadowiony bezpośrednio na stopach i ławach fundamentowych. Drugi obiekt to wysoki budynek biurowy o 14 kondygnacjach nadziemnych i 1 podziemnej przy ul. Kraśnickiej w Lublinie. Konstrukcję nośną stanowi żelbetowy szkielet w postaci monolitycznych stropów opartych na słupach rozstawionych w miarę regularnej siatki. Budynek jest posadowiony bezpośrednio na płycie fundamentowej o zmiennej grubości.

Badania terenowe lessowego podłoża gruntowego obu obiektów obejmowały wiercenia i sondowania statyczne CPT a w przypadku obiektu przy ul. Cyprysowej również sejsmiczne badania dylatometryczne SDMT. Badania właściwości mechanicznych przeprowadzone na próbkach NNS obejmowały badania edometryczne, badania w aparacie bezpośredniego ścinania i badania trójosiowe. Kompleksowa analiza wyników badań terenowych i laboratoryjnych pozwoliła Doktorantowi na opracowanie przestrzennego modelu geotechnicznego podłoża gruntowego analizowanych obiektów doświadczalnych.

Na analizowanych budynkach została założona wielopunktowa geodezyjna sieć pomiarową umożliwiającą rejestrację przemieszczeń budynków w trakcie i po ukończeniu budowy. W przypadku budynku przy ul. Cyprysowej założono 18 punktów pomiarowych z czego w ostatnim etapie pomiarów pozostało 8 punktów dających wiarygodne odczyty. W okresie 2 lat obserwacji największe przemieszczenia pionowe wynosiły 8 mm a ich przebieg nie wskazuje na ich stabilizację. W przypadku budynku przy ul. Kraśnickiej założono 14 punktów pomiarowych zamontowanych w płycie fundamentowej z czego w ostatnim etapie pomiarów pozostało 8 punktów. W okresie 3 lat obserwacji największe przemieszczenia pionowe wynosiły 22 mm a ich przebieg również nie wskazuje na ich stabilizację. W celu sprawdzenia poprawności przyjętych założeń w modelu numerycznym konstrukcji zastosowano pomiary drgań budynku. Do weryfikacji modelu wykorzystano pomiary przyspieszeń drgań pionowych w wybranych punktach konstrukcji wykonane po ukończeniu konstrukcji nośnej budynku.

W *rozdziale 5.* przedstawiono wyniki analizy numerycznej przeprowadzonej dla dwóch obiektów doświadczalnych wykonanych z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz sprężysto-plastycznego modelu gruntu typu zmodyfikowany Cam-Clay w programie ABAQUS. Przyjęty przez Doktoranta schemat postępowania w kompleksowej analizie numerycznej współpracy budowli z podłożem obejmował trzy etapy: kalibrację modelu budynku poprzez wariantowe obliczenia podpór (sztywne i przegubowe) i połączeń stropu i ściany (sztywne i przegubowe) z weryfikacją na podstawie pomiarów częstotliwości drgań;

kalibrację modelu podłoża poprzez wariantowe obliczenia odkształceń podłoża przy różnych wariantach doboru parametrów odkształceniowych z weryfikacją na podstawie pomiarów przemieszczeń pionowych; analizę współpracy budynku z podłożem z wykorzystaniem wybranych wariantów modelu konstrukcji i modelu podłoża. Proces budowy modelu podłoża podzielono na dwie części obejmujące kalibrację modeli częściowych odwzorowujących część podłoża pod fragmentami konstrukcji budynku oraz podłożem pod całym budynkiem. Parametry odkształceniowe podłoża w poszczególnych wariantach określono na podstawie badań edometrycznych (EDO1 i EDO2), sondowań statycznych (CPT1 i CPT2) oraz badań dylatometrycznych (DMT). Wyniki badań wskazują, że niejednorodność sztywności lessowego podłoża bardziej jednoznacznie można określić na podstawie profili oporów stożka  $q_c$ . Pełne obliczenia wariantowe w trzech etapach wykonano dla obiektu Cyprysowa, które umożliwiły wybór założeń modelu budynku i modelu podłoża w analizie współpracy budynku z podłożem dla obiektu Kraśnicka.

Wyniki obliczeń wykonane przez Doktoranta dla obiektu Cyprysowa wykazały, że wartości obciążeń przekazywanych na fundamenty wyznaczone metodą analityczną są większe niż wartości uzyskane z analizy numerycznej, szczególnie w przypadku naroży budynku. Wyniki kalibracji modeli częściowych odwzorowujących część podłoża pod fragmentami konstrukcji budynku wskazują, że dużo większe niż pomierzone osiadania otrzymano z obliczeń z wykorzystaniem parametrów odkształceniowych uzyskanych z badań edometrycznych. Lepszą zgodność obliczonych osiadań z wartościami pomierzonymi uzyskano przy wyznaczaniu parametrów odkształceniowych z badań dylatometrycznych i sondowań CPT, które przyjęto w rozprawie jako badania wiodące. Wyniki obliczeń wykonane dla układu cały budynek-podłożem gruntowe wykazały, że odkształcenia podłoża w istotny sposób wpływają na zmianę rozkładu sił wewnętrznych w konstrukcji. Zastosowanie sztywnego zamocowania podpór, modelującego posadowienie, powoduje pominięcie ważnych aspektów zachowania się budynku wynikających z nierównomiernych osiadań, szczególnie istotnych w przypadku budynków rozległych. W tym przypadku na poprawność prognozy zachowania się układu budynek-podłożem w istotny sposób wpływa uwzględnienie niejednorodności podłoża przy wykorzystaniu dla lessowego podłoża zmodyfikowanego modelu Cam-Clay do którego parametry wyznaczono na podstawie sondowań CPT i badań trójosiowych.

Wyniki obliczeń wykonane przez Doktoranta dla obiektu Kraśnicka potwierdziły zawyżenie prognozowanych osiadań otrzymanych z obliczeń z wykorzystaniem parametrów odkształceniowych uzyskanych z badań edometrycznych. Lepszą zgodność osiadań uzyskano przy wyznaczaniu parametrów odkształceniowych z sondowań CPT. Numeryczne modelowanie zachowania się układu budynek-lessowe podłożem wymaga zastosowania zmodyfikowanego modelu Cam-Clay do którego parametry wyznaczono na podstawie sondowań CPT i badań trójosiowych.

W *rozdziale 6.* przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe z uzyskanych przez Doktoranta wyników badań i analiz oraz kierunki dalszych badań.

### 3. Ocena pracy

Rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny. Mgr inż. Krzysztof Nepelski podjął się zbadania i oceny zachowania się układu budynek-lessowe podłoże. Dla zrealizowania założonego celu rozprawy Doktorant wykonał obszerne i bardzo dobrze udokumentowane nowoczesne badania laboratoryjne i terenowe podłoża lessowych. Bogaty materiał doświadczalny umożliwił Doktorantowi dokonanie oceny wybranych charakterystyk odkształceniowych i wytrzymałościowych analizowanych lessów oraz oceny statycznej pracy konstrukcji z uwzględnieniem nieliniowej odkształcalności podłoża gruntowego oraz jego wpływu na powstające odkształcenia i siły wewnętrzne w konstrukcji.

Za najważniejsze elementy oryginalne, stanowiące własny dorobek naukowy Doktoranta należy uznać:

- przeprowadzenie kompleksowej analizy numerycznej współpracy budowli z odkształcalnym podłożem lessowym z uwzględnieniem jego sprężysto-plastycznego zachowaniem się pod obciążeniem oraz jego wpływu na powstające w budowli odkształcenia i siły wewnętrzne,
- wyznaczenie charakterystyk i parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych badanych lessów do sprężysto-plastycznego modelu gruntu typu zmodyfikowany Cam-Clay,
- zweryfikowanie możliwości wykorzystania zmodyfikowanego modelu Cam-Clay w analizie numerycznej zachowania się układu budowla-lessowe podłoże na podstawie pomiarów przemieszczeń pionowych oraz przyspieszeń drgań pionowych,
- propozycja sposobu postępowania przy wydzielaniu jednorodnych warstw w lessowym podłożu wraz z wykazaniem możliwości wydzielenia w podłożu lessowym warstw o podobnej sztywności na podstawie analizy profilu oporu stożka  $q_c$  uzyskanego z sondowań statycznych CPT,
- weryfikacja przydatności istniejących zależności empirycznych oraz wyznaczenie współczynnika empirycznego  $\alpha_m$  do wyznaczania modułu ściśliwości badanych lessów na podstawie sondowań statycznych CPT,
- wykorzystanie pomiaru prędkości fali poprzecznej  $V_s$  do wyznaczenia początkowego modułu ścinania  $G_0$  badanych lessów na podstawie sejsmicznych badań dylatometrycznych SDMT.

Należy podkreślić, że założony przez Doktoranta naukowy cel pracy został osiągnięty. Przedstawione w pracy wnioski końcowe są w pełni udokumentowane i stanowią własny i oryginalny wkład Doktoranta w poznanie i ocenę współpracy budowli z odkształcalnym podłożem lessowym z uwzględnieniem jego sprężysto-plastycznego zachowaniem się pod obciążeniem.

#### 4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Analiza rozprawy doktorskiej nasunęła mi następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne, które powinny być wyjaśnione lub skomentowane podczas publicznej obrony pracy:

- komentarz podany w przeglądzie literatury na str. 32 dotyczący rodzajów badań trójosiowych (CD, CU, UU) wymaga dodatkowych wyjaśnień,
- w pracy wykorzystano dwa pojęcia „ściśliwość” i „odkształcalność”, które wymagają dodatkowego komentarza,
- jakie czynniki mogą w istotny sposób wpływać na zmianę właściwości lessów? Jaka jest różnica we właściwościach lessów eolicznych i lessów aluwialnych?
- interpretacja wyników podanych na str. 52 ze względu na uzyskany rozkład punktów po obu stronach dwusiecznej kąta widoczny na rys. 3.7 wymaga dodatkowego komentarza,
- na jakiej podstawie w profilach  $q_c = f(z)$  podanych na rys. 4.4 - 4.12 wydzielono warstwy charakteryzujące się różną sztywnością? Oprócz średnich wartości oporu stożka  $q_c$  wskazane byłoby podanie wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności. Uwaga ta dotyczy również uśrednionych modułów ściśliwości uzyskanych z sondowań CPT i badań DMT przedstawionych na rys. 5.14 i 5.15,
- jak wygląda krzywa uziarnienia badanych lessów?
- bardziej czytelne byłoby przedstawienie krzywych ściśliwości na rys. 5.7 – 5.9 przy osi X w skali logarytmicznej,
- porównanie współczynników prekonsolidacji OCR uzyskanych z badań edometrycznych i badań dylatometrycznych przedstawionych na rys. 5.9 i 5.10 wymaga dodatkowego komentarza. Jakie wartości wskaźnika naprężenia bocznego  $K_D$  uzyskano w podłożu lessowym? Jeśli uwzględni się, że w górnej strefie lessów OCR wynosi 2 jak wpłynie to na prognozowane przemieszczenia budynku?

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi krytyczne nie pomniejszają przedstawionych w recenzji własnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

Drobne poprawki w tekście, tabelkach i na rysunkach zostały zaznaczone w recenzowanym egzemplarzu i streszczeniu w języku polskim i angielskim oraz przekazane Doktorantowi w celu umożliwienia dokonania niezbędnych korekt przed przekazaniem części pracy do druku.

#### 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr inż. Krzysztof Nepelski przedłożył do oceny rozprawę doktorską opracowaną na podstawie nowoczesnych, bardzo dobrze zaprogramowanych i obszernych badań laboratoryjnych i terenowych służących ocenie współpracy obiektów budowlanych z odkształcalnym podłożem lessowym z uwzględnieniem jego sprężysto-plastycznego

zachowaniem się pod obciążeniem. Recenzowana praca wniosła oryginalne elementy poznawcze w dyscyplinie „budownictwo” wskazane w recenzji rozprawy, zatem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w odpowiednich przepisach. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązanie problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Nepelskiego pt. *„Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu gruntowym”* do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz

### Uwagi redakcyjne

do rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Nepelskiego pt.  
*„Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu gruntowym”*

Strona	Jest	Powinno być
w całej pracy	Model Coulomba-Mohra	Liniowo sprężysty-idealnie plastyczny model z kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra
w całej pracy	Model Druckera-Pragera	Liniowo sprężysty-idealnie plastyczny model z kryterium zniszczenia Druckera-Pragera
str. 7 i 30	$E_0$ początkowy moduł ściśliwości	$E_0$ początkowy moduł odkształcenia
str. 7 i 30	$E_{50}$ moduł ściśliwości w zakresie 50% ...	$E_{50}$ moduł odkształcenia w zakresie 50% ...
str. 8 str. 26 i 27 str. 125 i 172	nachylenie linii wtórnej konsolidacji w modelu Cam Clay	nachylenie linii powtórnego obciążenia w modelu Cam-Clay (ze względu na fakt, że wtórna konsolidacja i wtórne odkształcenia kojarzone są z pełzaniem)
str. 8 str. 26 i 27 str. 127 i 129 str. 172 i 189 str. 191	nachylenie linii pierwotnej konsolidacji w modelu Cam Clay	nachylenie linii pierwotnego obciążenia w modelu Cam-Clay (ze względu na fakt, że pierwotna konsolidacja kojarzona jest z przebiegiem odkształceń w czasie wywołanych rozpraszaniem nadwyżki ciśnienia wody w porach)
str. 10	CPTU (Undrained SCPTU (Seismic Undrained	U – nie oznacza „undrained” i to słowo należy usunąć U – oznacza możliwość pomiaru ciśnienia wody w porach
str. 11	gwałtownie spadać	gwałtownie zmniejszyć się
str. 25 str. 173	.. model Coulomba-Mohra Rys. 2.5 Model zniszczenia Coloumba-Mohra Model Druckera-Pragera	.. kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra Rys. 2.5 Kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra ... kryterium zniszczenia Druckera-Pragera ..
str. 29 i 62 str. 188 i 191	... początkową ściśliwość gruntu ... Rys. 2.9 Krzywa degradacji sztywności ...parametrów ściśliwości E – Young modułus (moduł ściśliwości ..	... początkową odkształcalność gruntu ... Rys. 2.9 Krzywa zmiany sztywności ...parametrów odkształceniowych E – Young modułus (moduł odkształcenia ..
str. 31	Rys. 2.10 dewiator naprężeń ...naprężenie ścinające	Rys. 2.10 dewiator naprężenia ...naprężenie styczne
str. 58	cm ... rozstawionych na w marę regularnej ... Całość posadowiona jest za pomocą płyty ...	zamienić na metry ... rozstawionych w marę regularnej ... Całość posadowiona jest na płycie ...
str. 86	Rys. 4.17 Wykresy krzywych ściśliwości i odprężenia ...	Rys. 4.17 Wykresy krzywych ściśliwości przy obciążeniu, odprężeniu i ponownym obciążeniu...
str. 93	Dla odprężenia i konsolidacji wtórnej moduły wyznaczono ...	Dla odprężenia i powtórnego obciążenia moduły wyznaczono ...
str. 114	hz	Hz
str. 116	... ABAQUS opartym na Metodzie ...	... ABAQUS wykorzystującym Metodę ...
str. 122 str. 172	Rys. 5.7 Krzywe konsolidacji ...	Rys. 5.7 Krzywe ściśliwości ...
str. 123	Rys. 5.8 Uśrednione krzywe konsolidacji ...	Rys. 5.8 Uśrednione krzywe ściśliwości ...
str. 123	Stopień prekonsolidacji OCR Wskaźnik prekonsolidacji OCR	Wymaga ujednoczenia
str. 124 str. 172	... jako nieskonsolidowany ...	... jako normalnie konsolidowany ... (OC – grunt prekonsolidowany NC – grunt normalnie konsolidowany)