

DOBÓR PARAMETRÓW MODELU CAM-CLAY DLA PODŁOŻA LESSOWEGO NA PRZYKŁADZIE ANALIZY MES 3D BUDYNKU ROZLEGŁEGO

Krzysztof Nepelski✉

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono analizę doboru parametrów modelu *Cam-Clay* na cele obliczeń MES dla rozległego budynku mieszkalnego wielorodzinnego. Parametry modelu wyprowadzono na podstawie polowych testów CPT oraz SDMT, a także laboratoryjnych badań trójosiowych i edometrycznych. Na budynku umieszczono repery geodezyjne, dla których okresowo wykonywano pomiary przemieszczeń pionowych metodą niwelacji precyzyjnej. W ramach analiz numerycznych przeprowadzono wieloetapowe obliczenia. Z modelu budynku wyodrębniono miejsca, gdzie umieszczone były repery, a następnie wykonano wielowariantowe obliczenia przy parametrach wyprowadzonych różnymi metodami. Po skalibrowaniu modeli częściowych w kolejnym kroku przeprowadzono obliczenia na pełnym modelu budynku łącznie z bryłą podłoża. Na każdym etapie wyniki przemieszczeń pionowych porównywano do wartości rzeczywistych pomierzonych geodezyjnie. W rezultacie otrzymano zbieżność przemieszczeń z analizy numerycznej z wartościami pomierzonymi geodezyjnie. Pozwoliło to na zaproponowanie metodyki wyprowadzania parametrów modelu *Cam-Clay* dla podłoża lessowego bezpośrednio z wyników badań polowych.

Słowa kluczowe: *Cam-Clay*, podłoże lessowe, CPT, SDMT, analiza MES 3D

WSTĘP

Jednym z najważniejszych czynników wpływającym na poprawność wyników analiz numerycznych współpracy obiektów z podłożem gruntowym jest przyjęcie właściwych parametrów modelu konstytutywnego gruntu. Bardzo często projektant nie dysponuje badaniami umożliwiającymi wyznaczenie wszystkich wymaganych parametrów modelu w sposób bezpośredni, dlatego bardzo ważne jest rozwijanie metod ich wyznaczania w sposób pośredni na podstawie dostępnych badań, a także weryfikacja obliczeń. Należy również podkreślić, że w klasycznych badaniach edometrycznych uzyskuje się charakterystyki odkształceniowe w zakresie dużych odkształceń, a grunt pod typowymi

fundamentami pracuje przy odkształceniach znacznie mniejszych, w szczególności w gruntach o dużej nośności (Truty, 2008; Godlewski i Szczepański, 2011; Lipiński, 2013). Dobór parametru sztywności w zakresie właściwych odkształceń jest niezwykle ważny, dlatego wykorzystywanie parametrów z badań edometrycznych prowadzi często do znacznego przeszacowania osiadania obiektu (Borowczyk i Frankowski, 1977; Gryczmański, 1995; Szulborski i Wysokiński, 2004; Wdowska i Wudzka, 2006), co również udowodniono w niniejszej pracy. Najlepszą weryfikacją wykonanych obliczeń są geodezyjne pomiary przemieszczeń budynku. Zasadniczym celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody wyznaczania parametrów modelu *Cam-Clay* podłoża lessowego z badań polowych,

Krzysztof Nepelski <https://orcid.org/0000-0001-9495-6457>

✉k.nepelski@pollub.pl

tj. sondowań statycznych CPT oraz testów dylatometrycznych SDMT, które pozwalają uzyskać wiarygodne wartości osiadania obiektu. Ma to szczególnie duże znaczenie dla podłoża lessowego, ponieważ makroskopowo zdaje się być jednorodne, w rzeczywistości jednak charakteryzuje się sztywnością o znacznej zmienności strefowej, którą identyfikuje się badaniami terenowymi (Nepelski i Rudko, 2018).

Przedstawiane w artykule analizy wykonano na obiekcie rzeczywistym – rozległym w planie budynkiem mieszkalnym wielorodzinnym o czterech kondygnacjach nadziemnych i jednej podziemnej. W ramach prac wykonano analizy numeryczne, liczne badania terenowe i laboratoryjne, a także monitorowano osiadania budynku za pomocą pomiarów przemieszczeń reperów geodezyjnych (Nepelski i Borowski, 2015).

MATERIAŁ I METODY

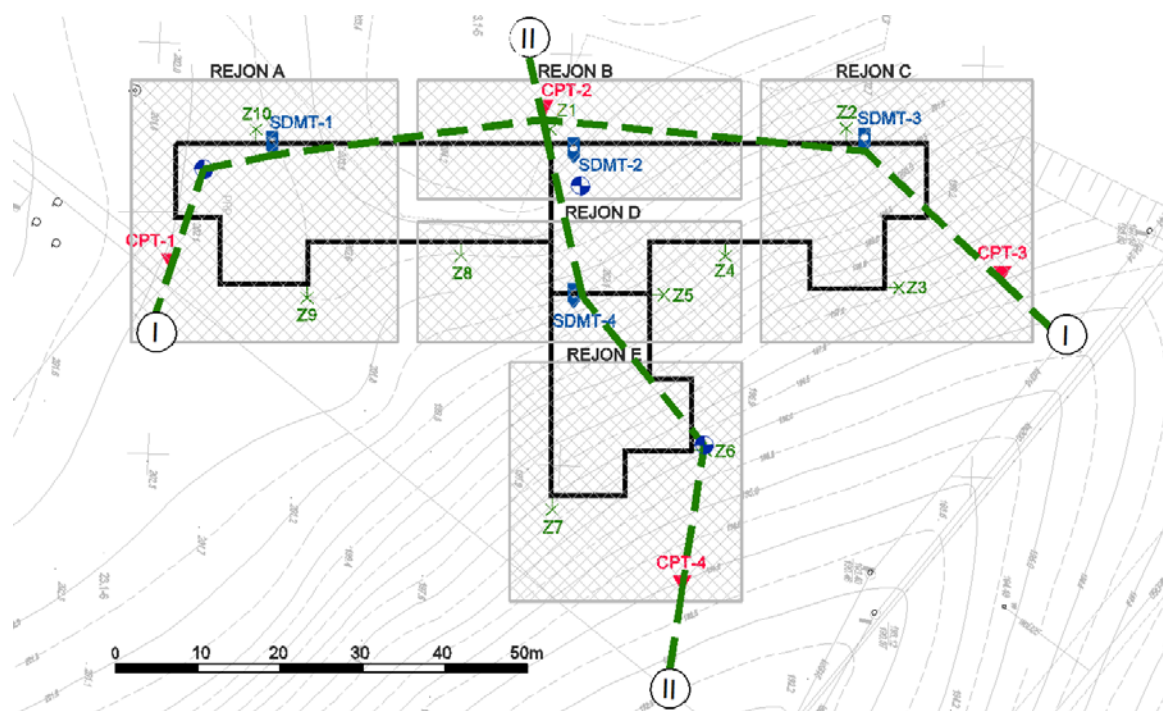
Badania geotechniczne

W celu wyznaczenia charakterystyk podłoża wykonano badania zarówno laboratoryjne, jak i terenowe. Na

badania terenowe składały się testy statycznego sondowania CPT oraz dylatometryczne z pomiarem sejsmicznym SDMT. Lokalizację badań przedstawiono na rysunku 1, a wyniki zostały szczegółowo opisane w pracy Nepelskiego (2019a). Na rysunku 2 przedstawiono poglądowo jeden z reprezentatywnych przekrojów geotechnicznych obrazujący warunki gruntowo-wodne w rejonie analizowanego obiektu. W ramach badań laboratoryjnych wykonywano między innymi badania trójosiowego ściskania i edometryczne. Wyznaczono również podstawowe cechy fizyczne, których średnie reprezentatywne wartości wyniosły odpowiednio: gęstość objętościowa $\rho = 1,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, wilgotność naturalna $w_n = 13,1\%$, wskaźnik porowatości $e = 0,66$, stopień wilgotności $S_r = 0,50$.

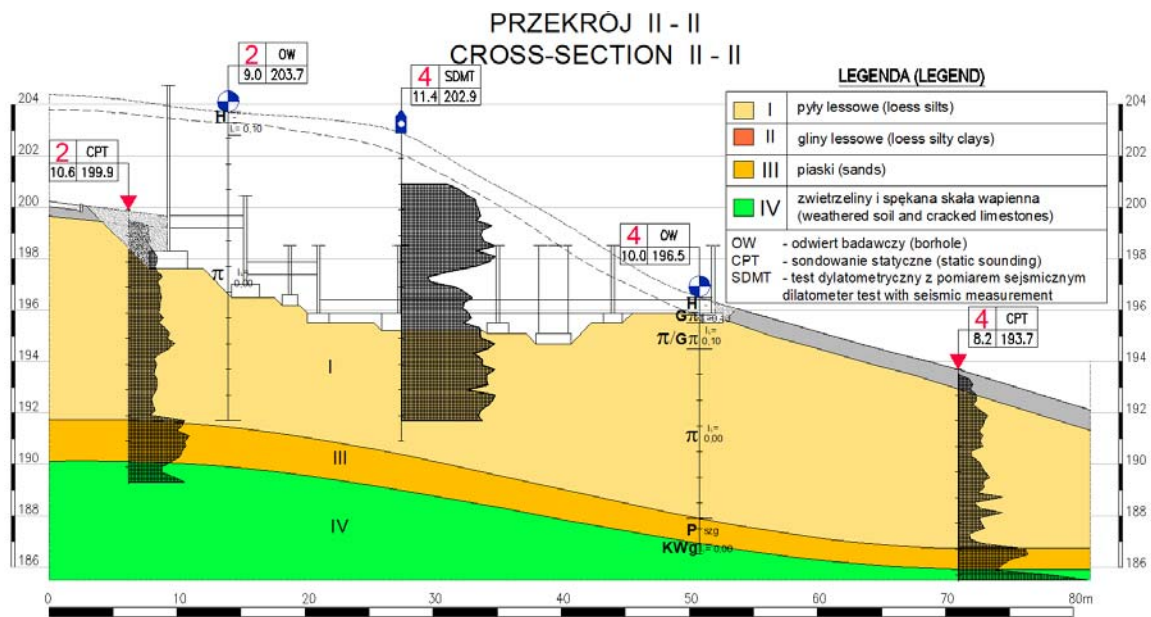
Modele numeryczne

Dobór właściwych parametrów modelu podłoża wymagał prowadzenia prac etapowo. Analizy podzielono na dwie zasadnicze części: budowę pełnego modelu budynku oraz ośmiu mniejszych modeli kalibracyjnych. Modele kalibracyjne odwzorowywały fragment



Rys. 1. Mapa z lokalizacją badań geotechnicznych, reperów oraz podziałem na rejony obliczeniowe

Fig. 1. Location map of geotechnical tests, benchmarks and division into computational regions

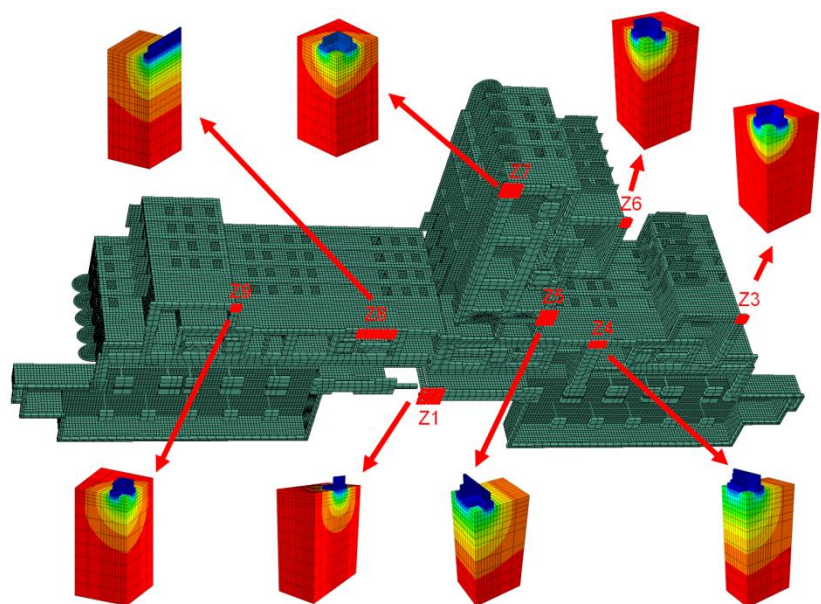


Rys. 2. Przekrój geotechniczny II–II
Fig. 2. Cross-section II–II

konstrukcji budynku w miejscach umieszczonych reperów pomiarowych i posłużyły do obliczeń w różnych wariantach parametrów podłoża i obciążeń. W dalszej części przedstawiono metodykę doboru parametrów za pomocą małych modeli kalibracyjnych. Na rysunku 3 schematycznie pokazano model

pełnego budynku (wyłączono bryłę podłoża grunto- wego) oraz miejsca, skąd wyodrębniono fragmenty konstrukcji do małych modeli kalibracyjnych.

Każdy z małych modeli składał się z trzech części: wycinka ściany, fundamentu oraz bryły podłoża. Aby ujednolicić obliczenia, dla każdego przypadku przyję-



Rys. 3. Model numeryczny budynku z lokalizacją reperów i małymi modelami kalibracyjnymi
Fig. 3. Numerical model of the building with benchmark location and small calibration models

to bryłę podłoża do głębokości 12,0 m poniżej poziomu posadowienia oraz wymiary $6,0 \times 6,0$ m w rzucie. Bryła podłoża w każdym z kierunków w rzucie poziomym była większa o minimum dwukrotność szerokości stopy, a na głębokości minimum trzy szerokości stopy. Wielkości bryły podłoża spełniały wytyczne opracowane na podstawie kilkudziesięciu pozycji literaturowych różnych autorów i zebrane w pracy Fedorowicz (2006). W dwóch modelach wykorzystano także symetrię układu.

Zarówno podłoże, jak i modelowane fragmenty konstrukcji zbudowano z elementów bryłowych dla konstrukcji C3D8R (trójwymiarowy, ośmiowęzłowy ze zredukowanym całkowaniem) oraz podłoża gruntowego C3D20R (trójwymiarowy, dwudziestowęzłowy ze zredukowanym całkowaniem). Wymiary boku elementów MES dla ściany i fundamentu przyjęto około 0,1 m. Dla bryły podłoża przyjęto wymiar od 0,2 m w miejscu połączenia z fundamentem do 1,5 m w najgłębszych rejonach. Wymiary siatki zwiększały się wraz ze wzrostem odległości od fundamentu. Podpo-

ry przyjęto jako przegubowe z możliwością przesuwu pionowego na krawędziach pionowych bryły gruntu oraz z blokadą przesuwu pionowego na spodzie bryły gruntu. Ostatecznie modele składały się z 1892–8940 elementów bryłowych, co dało 7039–32 583 węzłów o łącznej liczbie stopni swobody w zakresie 21 117–97 749. Dla elementów konstrukcji zastosowano model liniowo-sprężysty o parametrach betonu C25/30. Podłoże zamodelowano z wykorzystaniem modelu *Cam-Clay*.

Analizę podzielono na kroki obliczeniowe, w których kolejno odwzorowywano fazy wznoszenia budynku, co opisano w tabeli 1. W krokach Load 1–3 zwiększano obciążenie zgodnie z tym, jakie było podczas kolejnego pomiaru geodezyjnego. Obciążenie przykładano w formie równomiernego ciśnienia działającego na ścianę w jej górnej płaszczyźnie. Wartość ciśnienia wyliczono z naprężeń odczytanych z modelu numerycznego całego obiektu w strefie na styku fundamentu z podłożem (rys. 3). W rejonach reperów wydzielono strefy oznaczone kolorem czerwonym na

Tabela 1. Opis kroków obliczeniowych modeli częściowych

Table 1. Description of calculation steps for partial models

Krok – Step	Opis – Description
Geostatic	Jest to krok służący wprowadzeniu naprężeń geostatycznych do podłoża gruntowego. W górnej części wartość naprężeń wynika z nadkładu gruntu w poziomie posadowienia i wraz z głębokością rośnie zgodnie z ciężarem gruntu. Na tym etapie w modelu istnieje tylko bryła podłoża. Przemieszczenia podłoża nie występują. This is a step to introduce geostatic stress into the subsoil. On the top, the stress value is equal the geostatic stress from soil overburden at the foundation level and increases with the depth according to the weight of the soil. At this stage, only the subsoil part exists in the model. Subsoil displacement does not occur.
Footing	Wprowadzenie do modelu fundamentu wraz z wycinkiem ściany. Ze względu na niewielkie obciążenie i prace w zakresie naprężeń wtórnych przemieszczenia podłoża są nieznaczne. An introduction to the model geometry of foundation with a wall section. Due to the low load and work in the field of secondary stress, the displacement of the subsoil is insignificant.
Load 0	Obciążenie ściany występujące w momencie pierwszego pomiaru geodezyjnego, tzw. zerowego. Budowa jest na etapie stropu nad pierwszym piętrzem w segmencie A, stropu nad parterem w segmencie B oraz stropu nad parterem i ścianą piętra w segmencie C. Wall load occurring at the time of the first geodetic measurement, so-called Zero. The construction is at the stage of the ceiling above the first floor in segment A, the ceiling above the ground floor in segment B and the ceiling above the ground floor and the walls of the floor in segment C.
Load 1	Zwiększenie obciążenia ściany do pełnego ciężaru konstrukcji (pierwszy pomiar kontrolny). Increasing the wall load to the full weight of the structure (first control measurement).
Load 2	Zwiększenie obciążenia ściany o ciężar wykończenia budynku (drugi pomiar kontrolny). Increasing the wall load to the full weight of the structure (second control measurement).
Load 3	Zwiększenie obciążenia ściany o część obciążenia użytkowego (trzeci pomiar kontrolny). Increasing the wall load to the full weight of the structure (third control measurement).

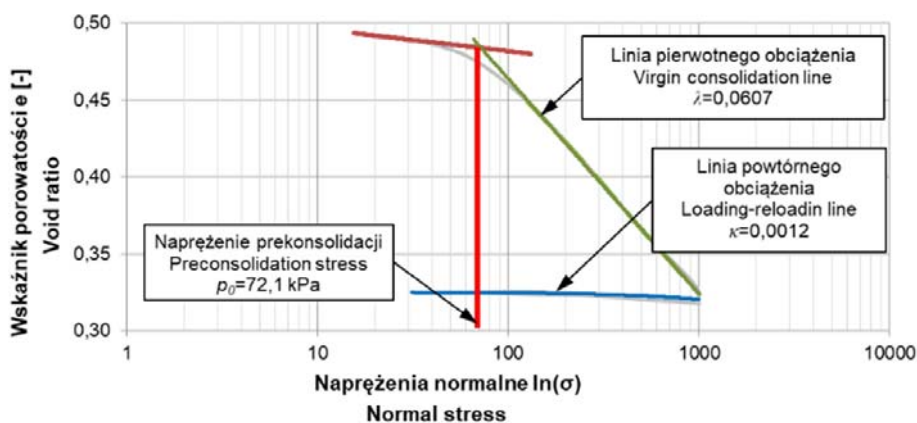
Tabela 2. Zestawienie naprężeń pod fundamentami w rejonie reperów geodezyjnych (na podstawie analiz numerycznych)
Table 2. Stresses under foundations in the area of geodetic benchmarks (based on numerical analyzes)

Reper Benchmark	Pole powierzchni Area [m ²]		Naprężenia pod fundamentem w fazach Stresses under the foundation in phases [kPa]				Obciążenie na ścianę w fazach Wall load in phases [kPa]			
	ściana wall	fundament foundation	0	1	2	3	0	1	2	3
1	0,31	4,50	95,1	150,8	195,1	207,7	1397,9	2216,2	2866,6	3052,4
3	0,74	3,84	63,7	120,1	140,3	145,8	331,7	625,6	730,5	759,1
4	1,34	6,00	76,0	143,7	173,2	181,8	339,2	641,5	773,5	811,8
5	1,81	7,00	38,0	80,3	93,4	97,1	147,2	310,9	361,9	376,2
6	0,80	3,84	56,5	99,3	123,4	130,5	271,0	476,7	592,4	626,2
7	1,04	7,70	46,4	80,3	102,4	109,6	344,6	595,8	760,1	813,7
8	0,75	4,20	67,2	97,5	114,4	118,7	376,4	546,2	640,4	664,5
9	0,75	3,00	76,7	110,9	132,4	139,0	306,7	443,5	529,7	555,8

rysunku 3 i odczytano naprężenia normalne w węzłach, w poszczególnych fazach budowy. Następnie wartości uśredniono, wyznaczając naprężenia reprezentatywne dla każdej ze stref. Przy wyznaczaniu obciążenia na ścianę ciśnienie zwiększono proporcjonalnie zgodnie z powierzchnią elementów. Przykładowo w modelu Z1 powierzchnia fundamentu wynosiła 4,50 m², a ściany około 0,31 m², co daje wielokrotność 14,7. Z tego powodu w kroku Load 0, gdy naprężenia pod fundamentem wyniosły 95,1 kPa, na ścianę przyjęto ciśnienie 1397,9 kPa. W tabeli 2 zestawiono wartości dla wszystkich faz i modeli.

Dobór parametrów modelu *Cam-Clay*

Wyjściowe podstawowe parametry odkształceniowe modelu *Cam-Clay* wyznaczono z badań edometrycznych. Wykorzystano wyniki z testów wykonanych na trzech próbkach. Dla poszczególnych przedziałów naprężeń pierwotnych i wtórnych obliczono parametry λ i κ na podstawie nachylenia odpowiadających odcinków wykresu $e-\ln(\sigma)$ oraz wyznaczono naprężenie prekonsolidacji – p_0 (rys. 4), które odpowiadało naprężeniom geostatycznym wynikającym z głębokości pobrania próbki. Wskazuje to, że grunt jest normalnie skonsolidowany, co jest zgodne z genezą lessów.



Rys. 4. Wykres $e-\ln(\sigma)$ z badań edometrycznych dla próbki 2

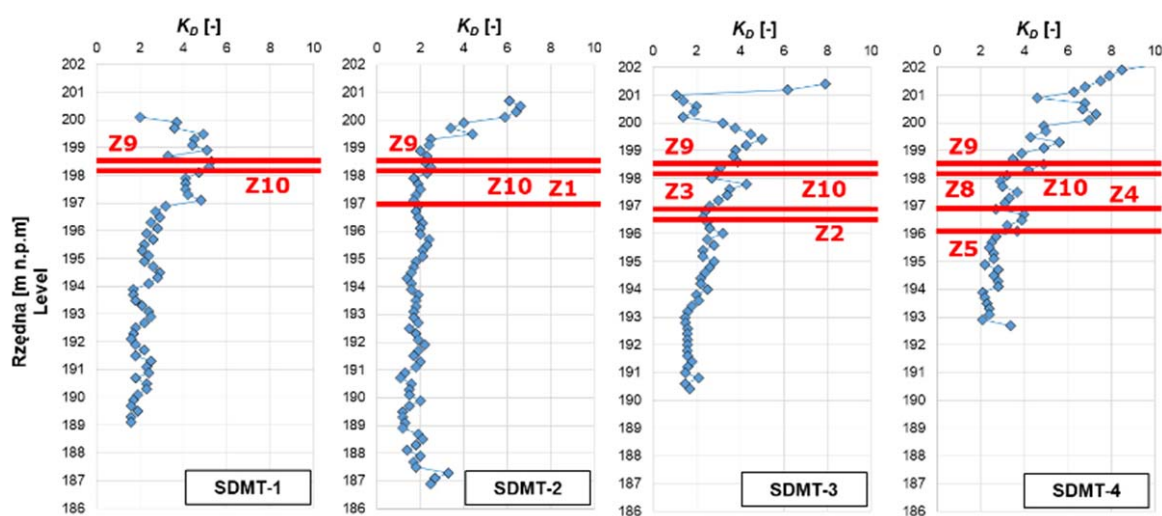
Fig. 4. Graph $e-\ln(\sigma)$ based on oedometric tests for sample 2

Prawidłowość naprężeń prekonsolidacji (p_0) wyznaczonych z pojedynczych badań edometrycznych zweryfikowano wynikami terenowych testów dylatometrycznych SDMT, dla których możliwe jest oszacowanie rozkładu wskaźnika prekonsolidacji (OCR) z głębokością. Wskaźnik OCR z badań DMT nie jest parametrem mierzonym bezpośrednio, a jedynie interpretowanym z wykorzystaniem formuł przeliczeniowych na podstawie wskaźnika naprężenia bocznego (K_D). Wyznaczenie OCR na podstawie testów DMT jest związane z rodzajem gruntu i zależnościami lokalnymi. Dla gruntów spoistych istnieje wiele interpretacji regionalnych, a dla gruntów piaszczystych, czyli o wskaźniku materiałowym $I_D > 1,2$, wyznaczenie OCR jest dużo trudniejsze i według najnowszych badań łączy się je z oporem stożka (q_c) z sondowania CPT (Lechowicz i Szymański, 2002; Marchetti, 2015). Lessy są gruntami przejściowymi, dlatego wyznaczenie OCR nie jest jednoznaczne, a autor niniejszej pracy nie dotarł do satysfakcjonująco wiarygodnej interpretacji wyników DMT pod względem oceny OCR w tych gruntach. Aby przedstawić charakter prekonsolidacji gruntu, na rysunku 5 pokazano rozkład wskaźnika K_D na głębokości, ponieważ niezależnie od dokładnej wartości OCR wskaźnik K_D bardzo dobrze odzwierciedla historię gruntu. Dodatkowo zaznaczono poziom posadowienia w rejonach reperów

pomiarowych. Wykorzystując pierwotne formuły Marchettiego, w uproszczeniu można przyjmować, że $OCR = 1$ dla $K_D = 2$. Dla wykonanych badań wartości wskaźnika K_D wskazują na niewielką prekonsolidację stref przypowierzchniowych, co może być związane z czasowym składowaniem gruntu z sąsiednich budynków. Jednocześnie może to być również efekt „pseudoprekonsolidacji” związany z cementacją gruntu węglanem wapnia (Marchetti, 2015; Młynarek, Wierzbicki i Mańka, 2015). Znaczny wzrost K_D w strefie przypowierzchniowej jest zjawiskiem powszechnym i często rejestrowanym w badaniach DMT lessów na terenie Lublina. Głębiej grunt należy zaś określić jako normalnie skonsolidowany, ponieważ $K_D \sim 2$. Reasumując, otrzymane wykresy K_D –*Rzędna* świadczą o gruncie normalnie skonsolidowanym, a wzrost OCR w wyższych partiach jest typowy dla strefy przypowierzchniowej (Jamiolkowski, Ladd, Germaine i Lancellotta, 1985; Fedorowicz i Fedorowicz, 2010), dlatego do obliczeń przyjęto, że grunt jest normalnie skonsolidowany, a naprężenia prekonsolidacji odpowiadają naprężeniom geostatycznym.

Na podstawie kąta tarcia wewnętrznego $\varphi' = 35^\circ$ wyznaczonego w badaniach trójosiowego ściskania wyliczono parametr M modelu *Cam-Clay* ze wzoru

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'}$$



Rys. 5. Rozkład wskaźnika K_D z głębokością z testów SDMT
Fig. 5. Distribution of K_D on depth from SDMT tests

Wskaźniki porowatości e_0 (początkowy) oraz e_1 (dla przecięcia linii pierwotnego obciążenia z osią e , na płaszczyźnie $\ln p'-e$) wyznaczono z podstawowych badań laboratoryjnych i wykresów konsolidacji, a następnie obliczono zasięg obwiedni plastyczności (a_0) ze wzoru $a_0 = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{e_1 - e_0 - \kappa \ln p_0}{\lambda - \kappa}\right)$.

Parametry modelu *Cam-Clay* wyliczono na podstawie badań trzech próbek, a następnie wyniki uśredniono i potraktowano je jako wartości wyjściowe (tab. 3). W procesie kalibracji parametrów modelu *Cam-Clay* obliczenia przeprowadzono w pięciu wariantach parametrów podłoża, które nazwano: EDO1, EDO2, CPT1, CPT2 oraz DMT. Wyjściowo dla wariantu EDO1 wszystkie parametry wyprowadzono na podstawie badań laboratoryjnych, modyfikując część z nich w pozostałych wariantach. Jako niezmiennicze założono kąt tarcia wewnętrznego i ściśliwość wtórną, a więc parametry modelu *Cam-Clay* M oraz κ . Pozostałe parametry wyznaczano z testów CPT i SDMT wykonanych w najbliższym sąsiedztwie rozpatrywanego repera, wyodrębniając w ten sposób pięć rejonów obliczeniowych (rys. 1). Dla reperów Z2 oraz Z10 nie wykonano obliczeń ze względu na brak informacji o końcowym osiadaniu, gdyż podczas realizacji obiektu repery uległy zniszczeniu. Weryfikację wyników wykonano na podstawie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń reperów na obiekcie rzeczywistym.

W wariancie EDO1 parametry wyprowadzono na podstawie wyników badań edometrycznych wykonanych na próbach NNS pobranych z poziomu posadowienia. Przyjęto wartość średnią z trzech badań. Założono podłoże jednorodne na całej głębokości.

W wariancie EDO2 parametry wyprowadzono na podstawie badań edometrycznych, jednak z przyjętym kryterium stabilizacji osiadania po dwóch godzinach badania. Istniejące wyniki zmodyfikowano, usuwając dane po upływie drugiej godziny, co skutkowało zwiększeniem modułów ściśliwości. Założono podłoże jednorodne na całej głębokości.

W wariancie CPT1 parametry wyprowadzono na podstawie sondowań statycznych CPT. Do obliczeń niezbędne były parametry modelu *Cam-Clay*, których nie można uzyskać bezpośrednio z testów CPT, dlatego też opracowano własną procedurę przeliczeniową. W pierwszym kroku wyznaczono moduł ściśliwości z sondowania CPT. Po analizie formuł interpretacyjnych (Nepelski, 2019a) przyjęto zależność Sanglerata (1972), na podstawie której moduł ściśliwości wyliczono ze wzoru $M = \alpha_m q_c$ ze współczynnikiem $\alpha_m = 6$. Następnie wyprowadzono parametry odkształceniowe modelu *Cam-Clay* λ i κ . Ze względu na $OCR \sim 1$ oraz głębokość posadowienia w zakresie 4–7 m poniżej poziomu terenu istniejącego przyjęto, że do naprężeń około 70–120 kPa grunt pracuje w zakresie naprężeń wtórnych. Dla naprężeń wtórnych parametr κ modelu *Cam-Clay* przyjęto z badań edometrycznych, tj. $\kappa = 0,0014$. Zakres naprężeń dodatkowych, czyli pojawiających się po raz pierwszy w gruncie, waha się w granicach 70–250 kPa. Aby wyznaczyć parametr λ , „zmodyfikowano” więc rzeczywiste wyniki badań edometrycznych dla zakresu naprężeń 126–252 kPa, przyjmując, że w tym zakresie występuje moduł ściśliwości wyprowadzony z sondowań CPT. Następnie wyliczono wskaźnik ściśliwości (C_c), na podstawie którego z zależności $\lambda = C_c / 2,3$ wyznaczono nachylenie linii pierwotnego

Tabela 3. Zestawienie parametrów modelu *Cam-Clay* na podstawie badań laboratoryjnych

Table 3. Comparison of parameters of the *Cam-Clay* model based on laboratory tests

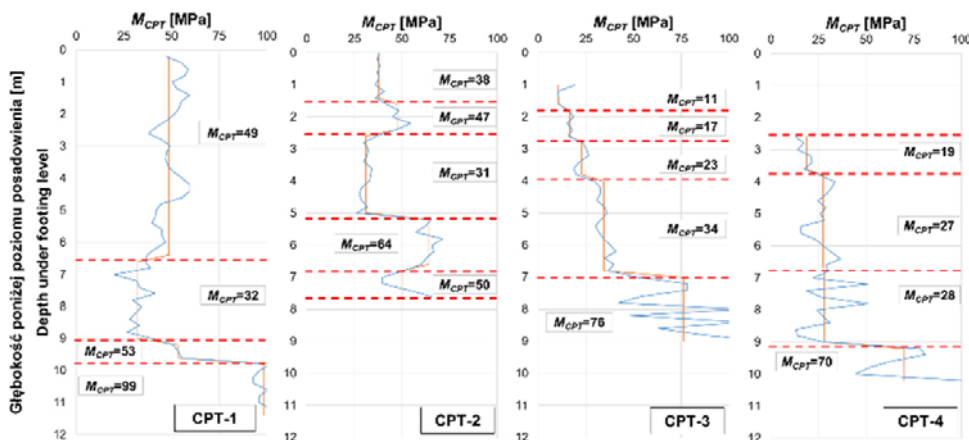
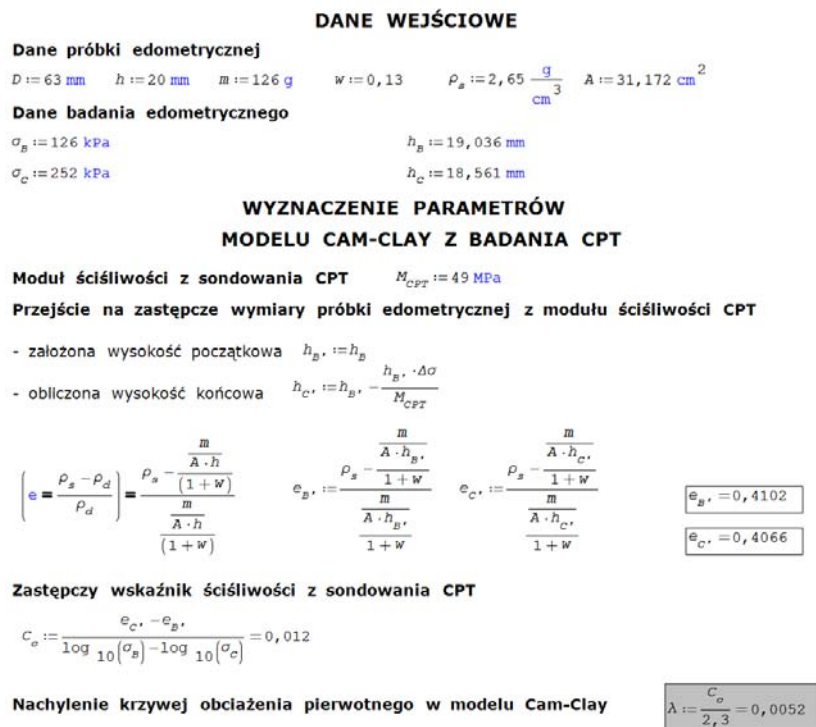
Próbka Sample	Parametry modelu <i>Cam-Clay</i> – <i>Cam-Clay</i> model parameters						
	λ	κ	M	a_0	p_0	e_1	e_0
1	0,0586	0,0016	1,495	37,0	84,4	0,638	0,378
2	0,0607	0,0012	1,495	33,1	72,1	0,538	0,278
3	0,0485	0,0015	1,495	34,4	78,8	0,567	0,356
Średnia – Average							
	0,0561	0,0014	1,495	34,5	77,4	0,584	0,340

obciążenia λ dla modelu *Cam-Clay*. W rozważanym wariantcie obliczeniowym założono podłoże jednorodne, przyjmując na całej głębokości parametry jak dla warstwy leżącej bezpośrednio pod fundamentem. Opisaną procedurę wyznaczania parametrów modelu z wyników badań polowych przedstawiono na rysunku 6 w formie wycinka obliczeń z programu SMath na przykładzie rejonu A, czyli sondowania CPT-1.

W wariantcie CPT2 parametry wyprowadzono również na podstawie sondowań statycznych CPT, jak w wariantcie CPT1, ale założono podłoże uwarstwione zgodnie z wydzieleniami wykonanymi na podstawie oporów stożka – q_c (rys. 7). Podział na podwarstwy wykonywano tylko dla strefy bezpośrednio pod fundamentem. Zmian poniżej 6 m od spodu fundamentu nie uwzględniano z powodu ich

Rys. 6. Procedura wyznaczania parametrów modelu *Cam-Clay* na przykładzie sondowania CPT-1 (np. rejon A, reper Z9) – wycinek obliczeń z programu SMath

Fig. 6. Procedure for determining parameters of the *Cam-Clay* model on the example of CPT-1 (e.g. region A, benchmark Z9) – a section of calculations from the SMath program



Rys. 7. Rozkład modułu ścisłości na głębokości z badań CPT z podziałem na warstwy

Rys. 7. Distribution of the constrained modulus at depth from CPT tests divided into layers

znikomego oddziaływania na osiadanie. Zmienność parametrów na tej głębokości miałyby wpływ jedynie w przypadku występowania bardzo słabych gruntów i znacznych obciążeń.

W wariancie DMT parametry wyprowadzono na podstawie testów dylatometrycznych SDMT. Analogicznie jak przy sondowaniach statycznych zastosowano

procedurę przejściową parametrów wyznaczonych *in situ* w badaniu SDMT na parametry modelu numerycznego *Cam-Clay*. Dla rejonu E, gdzie ze względów technicznych nie udało się wykonać sondowania SDMT, obliczeń w wariancie DMT nie przeprowadzono. Ostatecznie do obliczeń przyjęto parametry zestawione w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie parametrów modelu *Cam-Clay* dla modeli częściowych
Table 4. Comparison of *Cam-Clay* model parameters for partial models

Model częściowy Partial model	Wariant Variant	Warstwa gruntu Soil layer	Parametry modelu <i>Cam-Clay</i> – <i>Cam-Clay</i> model parameters						
			λ	κ	M	a_0	p_0	e_1	e_0
Z1	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	34,5	95	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,1	95	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0071	0,0014	1,495	19,3	95	0,584	0,552
	CPT2	1	0,0071	0,0014	1,495	19,3	95	0,584	0,552
		2	0,0040	0,0014	1,495	13,1	209	0,584	0,565
	DMT	1	0,0078	0,0014	1,495	20,9	95	0,584	0,548
Z3	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	35,3	38	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,4	38	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0075	0,0014	1,495	9,9	38	0,584	0,556
	CPT2	1	0,0112	0,0014	1,495	9,9	38	0,584	0,556
		2	0,0075	0,0014	1,495	16,1	78	0,584	0,554
		3	0,0034	0,0014	1,495	8,6	98	0,584	0,567
	DMT	1	0,0052	0,0014	1,495	7,1	38	0,584	0,565
Z4	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	34,4	114	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,0	114	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0071	0,0014	1,495	25,1	114	0,584	0,546
	CPT2	1	0,0071	0,0014	1,495	25,1	114	0,584	0,546
		2	0,0040	0,0014	1,495	10,8	152	0,584	0,566
		3	0,0034	0,0014	1,495	25,4	182	0,584	0,554
	DMT	1	0,0064	0,0014	1,495	20,2	114	0,584	0,554
Z5	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	34,7	76	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,1	76	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0071	0,0014	1,495	18,0	76	0,584	0,549
	CPT2	1	0,0071	0,0014	1,495	18,0	76	0,584	0,549
		2	0,0040	0,0014	1,495	9,0	114	0,584	0,567
	DMT	1	0,0064	0,0014	1,495	14,7	76	0,584	0,556

Tabela 4, cd. – **Table 4**, cont.

Model częściowy Partial model	Wariant Variant	Warstwa gruntu Soil layer	Parametry modelu <i>Cam-Clay</i> – Cam-Clay model parameters						
			λ	κ	M	a_0	p_0	e_1	e_0
Z6	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	35,9	19	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,6	19	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0095	0,0014	1,495	6,0	19	0,584	0,558
	CPT2	1	0,0095	0,0014	1,495	6,0	19	0,584	0,558
		2	0,0037	0,0014	1,495	9,9	133	0,584	0,566
Z7	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	35,9	19	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,6	19	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0095	0,0014	1,495	6,0	19	0,584	0,558
	CPT2	1	0,0095	0,0014	1,495	6,0	19	0,584	0,558
		2	0,0037	0,0014	1,495	9,9	133	0,584	0,566
Z8	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	34,5	95	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,1	95	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0071	0,0014	1,495	20,9	95	0,584	0,548
	CPT2	1	0,0071	0,0014	1,495	20,9	95	0,584	0,548
		2	0,0040	0,0014	1,495	24,6	133	0,584	0,550
DMT	1	0,0064	0,0014	1,495	17,5	95	0,584	0,555	
Z9	EDO1	1	0,0561	0,0014	1,495	34,7	76	0,584	0,340
	EDO2	1	0,0512	0,0004	1,495	39,1	76	0,567	0,342
	CPT1	1	0,0052	0,0014	1,495	12,3	76	0,584	0,561
	CPT2	1	0,0052	0,0014	1,495	12,3	76	0,584	0,561
		2	0,0080	0,0014	1,495	33,0	209	0,584	0,549
DMT	1	0,0064	0,0014	1,495	14,7	76	0,584	0,556	

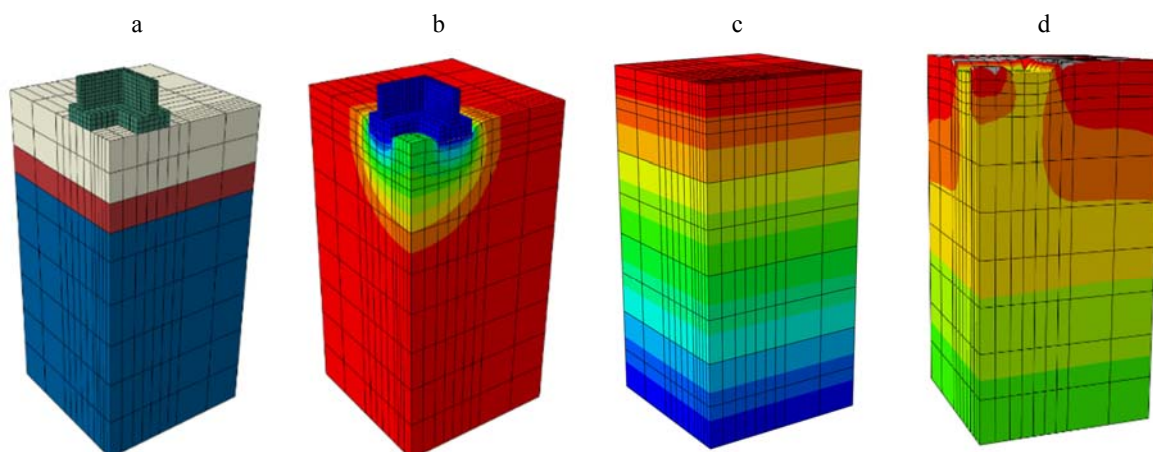
WYNIKI I DISKUSJA

Rezultatem obliczeń statycznych modeli były wartości przemieszczeń oraz naprężeń w poszczególnych fazach budowy. Kształt izolinii w mapach naprężeń oraz przemieszczeń dla różnych wariantów parametrów różnił się nieznacznie. Znaczące natomiast były wartości przemieszczeń pionowych. Na rysunku 8 przedstawiono wybrane bitmapy z obliczeń modelu Z3.

Na rysunku 9 dla modelu Z1 porównano wartości z obliczeń w poszczególnych fazach budowy i wariantach parametrów z wartościami pomierzonymi geode-

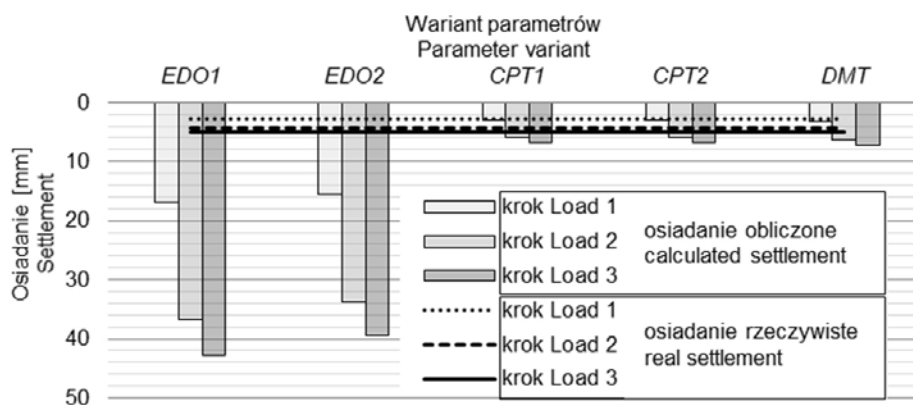
zyjnie. Wartości przemieszczeń podawano względem kroku Load 0, tak aby można było je porównać z pomiarami geodezyjnymi.

Wyniki obliczeń dla wszystkich modeli i wariantów parametrów zestawiono w tabeli 5. Podano również różnice między wartościami obliczonymi i pomierzonymi geodezyjnie. Największe przemieszczenia uzyskano w wariantach obliczeń z parametrami wyznaczonymi z badań edometrycznych (warianty EDO1 i EDO2). Wartości te zawsze były dużo większe i znacznie przekraczały osiadania rzeczywiste. Osiedlenie obliczone na parametrach z sondowań



Rys. 8. Model numeryczny wycinka budynku wraz z podłożem przy reperze Z3: a – widok z podziałem na warstwy, b – mapa przemieszczeń pionowych (krok Load 3), c – mapa naprężeń S33 (krok Geostatic), d – mapa naprężeń S33 (krok Load 3)

Fig. 8. Numerical model of the building section with the subsoil at the Z3 benchmark: a – division into layers, b – vertical displacement map (Load 3 step), c – stress map S33 (Geostatic step), d – stress map S33 (step Load 3)



Rys. 9. Osiadanie repera Z1 względem kroku Load 0 w różnych wariantach parametrów

Fig. 9. Settlement of benchmark Z1 relative to the Load 0 step in various parameter variants

Tabela 5. Porównanie osiadań końcowych i obliczonych dla modeli częściowych

Table 5. Comparison of final and calculated settlements for partial models

Real settlement Osiadanie rzeczywiste	Wariant Varant	Model częściowy (reper) – Partial model (benchmark)							
		Z1	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
		4,0	7,1	5,8	5,1	7,2	7,8	2,3	5,8
Osiadanie obliczone Calculated settlement s [mm]	EDO1	42,9	45,5	19,7	10,6	38,3	49,4	7,1	28,1
	EDO2	39,4	24,7	15,7	6,4	21,9	32,5	6,6	12,9
	CPT1	6,9	13,8	5,1	3,3	14,7	16,7	2,0	2,8
	CPT2	6,9	9,8	5,1	3,2	14,7	16,2	2,0	2,8
	DMT	7,3	6,6	4,6	3,0	–	–	1,8	3,1
Błąd obliczeń Calculation error Δs [mm]	EDO1	38,9	38,4	13,9	5,6	31,1	41,6	4,8	22,3
	EDO2	35,4	17,6	9,9	1,4	14,7	24,7	4,3	7,1
	CPT1	2,9	6,7	-0,7	-1,8	7,5	8,9	-0,3	-3,0
	CPT2	2,9	2,7	-0,7	-1,9	7,5	8,4	-0,3	-3,0
	DMT	3,3	-0,5	-1,2	-2,1	–	–	-0,5	-2,7

Wartości dodatnie (jasnoszary) oznaczają osiadanie obliczone większe niż rzeczywiste, a wartości ujemne (ciemnoszary) oznaczają osiadanie obliczone mniejsze niż rzeczywiste.

in situ dały wartości dużo bardziej zbliżone do osiadań rzeczywistych. W przypadku sondowań CPT prognozowane osiadanie jest raczej większe niż rzeczywiste, a z badań DMT nieznacznie mniejsze.

W kolejnym kroku ustalono błąd oszacowania. Nie porównywano wyników bezpośrednio, to znaczy, jeżeli rzeczywiste osiadanie wyniosło na przykład 1 mm, a z obliczeń 2 mm, to błąd wynosi 100%. W przypadku tego obiektu rzeczywiste osiadania są niewielkie, w związku z tym każde odchylenie od tych wartości analizowane bezpośrednio daje duży błąd. Autor uważa, że porównanie należy wykonać względem osiadań dopuszczalnych, które przyjęto jako 50 mm zgodnie z normą Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2008). Błędy względne (δ) dla poszczególnych modeli i wariantów parametrów zestawiono w tabeli 6, wyliczając je ze wzoru:

$$\delta_i = \frac{\Delta s_i}{s_{dop}}$$

gdzie:

δ_i – błąd względny w danym wariantcie,

Δs_i – błąd bezwzględny z obliczeń numerycznych w danym wariantcie,

s_{dop} – dopuszczalne osiadanie, przyjęte 50 mm.

Dla wariantu EDO1 błąd wahał się w zakresie 10–78%, ze średnią wartością 49%. Dla wariantu EDO2 błąd wahał się w zakresie 3–71%, ze średnią

wartością 29%. Błędy oszacowania dla tych wariantów należy uznać za bardzo duże, chociaż skierowane w stronę bezpieczną.

Dla obliczeń z parametrami z sondowania CPT błąd wahał się w granicach 1–18%, ze średnią wartością 8% dla uproszczonego podłoża jednorodnego (wariant CPT1) oraz 7% dla podłoża uwarstwionego (wariant CPT2). Wartości wskazują raczej na tendencję przeszacowania osiadań w stronę bezpieczną, a wynik ten można uznać za bardzo dobry.

Dla obliczeń z wykorzystaniem parametrów z testów SDMT błąd wahał się w granicach 1–7%, przyjmując wartość średnią 3%. Wartość dopasowania jest najlepsza, jednak w tym wypadku szacowane osiadania były zazwyczaj mniejsze od rzeczywistych. Wynik ten również należy uznać za bardzo dobry.

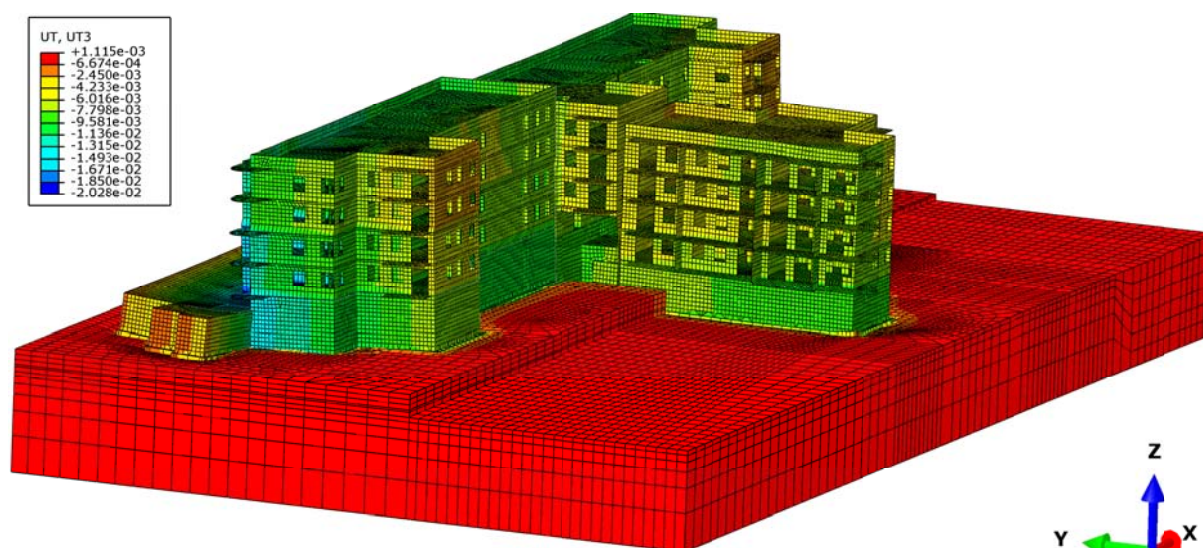
Po analizie wykresów osiadania reperów w czasie, opisaną w rozprawie doktorskiej Nepelskiego (2019b), wywnioskowano, że proces osiadania budynku w zasadzie się zakończył. Jedynie niektóre z reperów, szczególnie te usytuowane na krawędzi budynku przy skarpie (Z3, Z6, Z7), wykazują tendencję do pogłębiania osiadań jeszcze przez jakiś czas. W związku z tym osiadania szacowane z wykorzystaniem parametrów CPT dla tych reperów (większe niż pomierzone) za jakiś czas mogą być jeszcze bliższe rzeczywistym. Wyznaczone w procesie kalibracyjnym parametry modelu *Cam-Clay* posłużyły do opisu podłoża grunto-

Tabela 6. Zestawienie względnych błędów obliczeń

Table 6. Comparison of relative calculation errors

Wariant Variant	Błąd względny – Relative error [%]									
	reper – benchmark								średnio average	średnio (bez Z6 i Z7) average (without Z6 and Z7)
	Z1	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9		
EDO1	77,7	76,8	27,8	11,1	62,3	83,2	9,6	44,5	49,1	41,3
EDO2	70,7	35,2	19,8	2,7	29,5	49,4	8,6	14,1	28,8	25,2
CPT1	5,7	13,4	-1,4	-3,5	15,1	17,8	-0,6	-6,1	7,9	5,1
CPT2	5,7	5,4	-1,4	-3,7	15,1	16,8	-0,6	-6,1	6,8	3,8
DMT	6,5	-1,0	-2,4	-4,1	–	–	-1,0	-5,5	3,4	3,4

Wartości dodatnie (jasnoszary) oznaczają osiadanie obliczone większe niż rzeczywiste, a wartości ujemne (ciemnoszary) oznaczają osiadanie obliczone mniejsze niż rzeczywiste.



Rys. 10. Mapa przemieszczeń pionowych [m] uzyskana w analizie modelu całego budynku z wykorzystaniem parametrów modelu *Cam-Clay* wyznaczonych na małych modelach kalibracyjnych

Fig. 10. Map of vertical displacements [m] obtained in the analysis of the whole building model using the parameters of the *Cam-Clay* model determined on small calibration models

wego w analizie numerycznej całego budynku łącznie z bryłą podłoża gruntowego, który poglądowo przedstawiono na rysunku 10.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczania i kalibracji parametrów modelu *Cam-Clay* z sondowań statycznych i testów dylatometrycznych. Przedstawiona procedura nie jest metodą bezpośrednią określania parametrów, jednak biorąc pod uwagę dostępność testów terenowych, szybkość ich wykonania oraz ilość danych, jaką dostarczają, jest podstawą do szybkiego oszacowania parametrów na cele obliczeń numerycznych.

Znaczne osiadanie uzyskane z obliczeń na parametrach z badań edometrycznych jest związane w dużej mierze z innym zakresem odkształceń, jakie powstają w badaniach edometrycznych i pod fundamentami. Jest to zagadnienie szeroko opisywane w literaturze (Wdowska i Wudzka, 2006; Truty, 2008; Godlewski i Szczepański, 2011) i określane tzw. krzywą degradacji sztywności przedstawiającą zmianę sztywności gruntu w zależności od odkształceń. Grunt jest

ośrodkiem o silnie nieliniowym zachowaniu i bardzo istotne jest wyznaczanie parametrów w zakresie odkształceń występujących w rzeczywistych warunkach. Należy również zaznaczyć, iż pomimo zachowywania wszelkich starań próbka gruntu przeniesiona do laboratorium zawsze w pewien sposób zostaje naruszona, a w szczególności zostaje zaburzony stan naprężeń, co również może wpływać na wyniki. W przypadku lessów trudno jest uzyskać dobre jakościowo próbki, gdyż są to grunty mało spoisłe o stosunkowo dużej wytrzymałości, co skutkuje problemami przy ich formowaniu w laboratorium. Próbki często rozsypują się, pękają i rozwarstwiają podczas wyciskania.

Poprawność parametrów wyprowadzonych w sposób pośredni z badań terenowych została zweryfikowana pomiarami geodezyjnymi. Przedstawiona metodyka może być wykorzystywana do analiz współpracy obiektów posadowionych na podłożu lessowym. Biorąc pod uwagę niewielkie osiadania rzeczywiste w stosunku do wartości dopuszczalnych oraz złożoność konstrukcji, dopasowanie otrzymanych wyników uznano za bardzo dobre. Rozpoznanie podłoża lessowego powinno zawsze być wykonywane z użyciem sondowań, ponieważ pozwalają one na

zidentyfikowanie stref o zmiennej sztywności. Informacje z samych odwiertów nie dostarczają wystarczających danych do stworzenia właściwego modelu geotechnicznego.

PIŚMIENNICTWO

- Borowczyk, M. i Frankowski, Z. (1977). Zmienność właściwości geotechnicznych lessów w świetle współczesnych metod badań. *Kwartalnik Geologiczny*, 23 (2), 447–461.
- Fedorowicz, L. (2006). Zagadnienia kontaktowe budowa-podłoże gruntowe. Część 1. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana-podłoże gruntowe. *Zeszyty Naukowe. Budownictwo*, 107, 3–153.
- Fedorowicz, L. i Fedorowicz, J. (2010). Zachowanie gruntów prekonsolidowanych obciążonych budowlą – modelowanie numeryczne. *Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele*, 25, 22–27.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2011). Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu (G_0). Metody oznaczania i przykłady zastosowań. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2, 243–250.
- Gryczmański, M. (1995). O kalibrowaniu modeli konstytutywnych gruntów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 80, 37–52.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. i Lancellotta, R. (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. W *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 12–16.08.1985 (strony 57–154). Boca Raton: CRC Press.
- Lechowicz, Z. i Szymański, A. (2002). *Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych*. Cz. I. *Metodyka badań*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Lipiński, M. (2013). *Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Marchetti, S. (2015). Some 2015 Updates to the TC16 DMT Report 2001. W S. Marchetti, P. Monaco i A. Viana da Fonseca (red.), *The 3rd International Conference on the Flat Dilatometer DMT'15* (strony 43–65). Rome.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Mańka, M. (2015). Geotechnical parameters of loess soils from CPTU and SDMT. W S. Marchetti, P. Monaco i A. Viana da Fonseca (red.), *The 3rd International Conference on the Flat Dilatometer DMT'15* (strony 481–489). Rome.
- Nepelski, K. (2019a). Interpretation of CPT and SDMT tests for Lublin loess soils exemplified by Cyprysowa research site. *Budownictwo i Architektura*, 18 (3), 63–72. doi: 10.35784/bud-arch.890
- Nepelski, K. (2019b). *Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu gruntowym* (rozprawa doktorska). Politechnika Lubelska, Lublin.
- Nepelski, K. i Borowski, Ł. (2015). Pomiary osiadania zespołu budynków mieszkalnych posadowionych na lessach. *Inżynieria i Budownictwo*, 71 (7), 359–361.
- Nepelski, K. i Rudko, M. (2018). Identyfikacja parametrów geotechnicznych lessów lubelskich na podstawie sondowań statycznych CPT. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 27 (2), 186–198. doi: 10.22630/PNIKS.2018.27.2.18
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Sanglerat, G. (1972). *The penetrometer and soil exploration*. Amsterdam: Elsevier.
- Szulborski, K. i Wysokiński, L. (2004). *Ocena współpracy konstrukcji z podłożem*. Referat na VIII Konferencji naukowo-technicznej „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego”, Cedzyna.
- Truty, A. (2008). Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 3, 107–126.
- Wdowska, M. K. i Wudzka, A. (2006). Czynniki warunkujące zmienność modułu odkształcenia gruntów spoistych. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 15 (1), 64–74.

SELECTION OF CAM-CLAY MODEL PARAMETERS FOR LOESS SUBSOIL AS EXEMPLIFIED BY A FEM 3D ANALYSIS OF A WIDE BUILDING

ABSTRACT

The paper presents an analysis of the parameters selection for the Cam-Clay model for the purposes of FEM calculations concerning a wide residential building. Model parameters were determined on the basis of CPT and SDMT field tests, as well as laboratory triaxial and oedometer tests. Geodetic benchmarks for which vertical displacement measurements were periodically carried out using the precision levelling method were placed on the building. Multi-stage calculations were performed as part of numerical analyses. The places where benchmarks had been placed were separated using a model of the building. Subsequently, multivariate calculations were made with parameters derived using various methods. After calibrating the partial models, the next step consisted of calculations in respect of the entire building model, including the subsoil. At each stage, the results of vertical displacements were compared to the real values measured geodetically. As a result, a convergence of displacements from both the numerical analysis and the values measured geodetically was achieved. This allowed us to propose a methodology for determining the parameters of the Cam-Clay model for the loess subsoil directly on the basis of the results of field tests.

Key words: Cam-Clay, loess subsoil, CPT, SDMT, FEM 3D analysis