

# **Weryfikacja parametrów podłoża gruntowego z wykorzystaniem analizy wstecznej na przykładzie wiaduktu drogowego**

**Krzysztof Nepelski**

*Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: k.nepelski@pollub.pl*

**Streszczenie:** W pracy zaproponowano metodę modelowania niejednorodnego podłoża oraz dobór jego parametrów. W artykule opisano analizę posadowienia wiaduktu drogowego. Wykonano obliczenia numeryczne MES podpory wiaduktu łącznie z bryłą podłoża gruntowego zdefiniowanego modelem Cam Clay. Przeprowadzono szereg obliczeń z wykorzystaniem zmiennych parametrów podłoża. Wyniki porównano z pomiarami geodezyjnymi. Postępując zgodnie z zasadami analizy wstecznej zweryfikowano właściwości podłoża wyznaczone za pomocą badań laboratoryjnych oraz odwiertów.

**Słowa kluczowe:** projektowanie fundamentów, Cam Clay, podłoże gruntowe, analiza wsteczna

## **1. Wprowadzenie**

Rozwój nauki oraz technologii spowodował, że coraz powszechniejsze stały się obliczenia projektowe konstrukcji łącznie z bryłą podłoża zdefiniowaną za pomocą zaawansowanych modeli gruntowych. Zaawansowane obliczenia realniej odzwierciedlają rzeczywistość pracę układu budowla-podłoże oraz pozwalają lepiej przewidzieć zachowanie obiektu. Problemem często bywa dobór parametrów modelu podłoża. Bardzo ważna jest weryfikacja przyjętych w obliczeniach charakterystyk, którą najlepiej wykonać stosując monitoring obiektu.

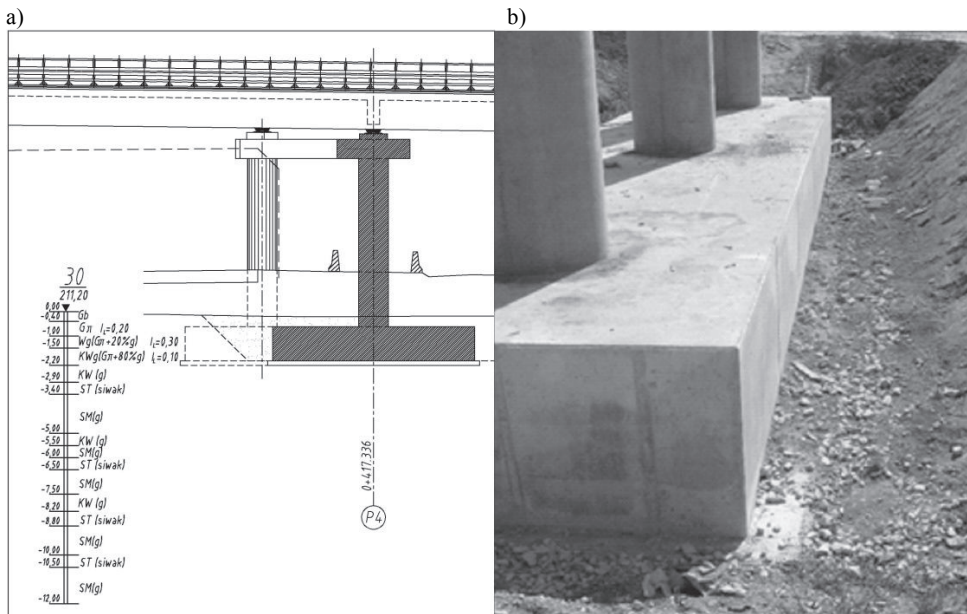
W artykule przedstawiono analizę pracy układu: podłoże o skomplikowanym układzie warstw i podpory wiaduktu. Zamodelowanie podłoża z uwzględnieniem dokładnego układu warstw jest niemożliwe, ponieważ wykonano zbyt mało badań gruntu. Z kolei, gdyby nawet się udało dokładnie zidentyfikować poszczególne warstwy w całym obszarze oddziaływania fundamentu, to model gruntu zawierałby tak dużo stopni swobody, że utrudnione byłoby modelowanie konstrukcji na nim posadowionym. Dlatego w artykule przedstawiono badania, które miały na celu sprawdzenie, czy możliwe jest zastosowanie jednorodnego gruntu zastępczego i, jeżeli tak, to jakimi parametrami ten grunt powinien być opisany. W tym celu przedstawiono wyniki obliczeń identyfikujące parametry podłoża gruntowego z wykorzystaniem analizy wstecznej. W opisywanym przypadku, poprzez analizę wsteczną rozumie się określenie odkształcalnych parametrów podłoża w wyniku obliczeń numerycznych, na podstawie pomiarów geodezyjnych obiektu. Bazując na częściowo znanej charakterystyce podłoża zdefiniowano wyjściowy model obliczeniowy. Początkowe parametry gruntu wyznaczono z badań laboratoryjnych, a następnie w wyniku obliczeń skorygowano je na podstawie geodezyjnych pomiarów osiadania obiektu w wydzielonych fazach budowy. Ostatecznie wynik doboru własności podłoża gruntowego został zastosowany do wyznaczenia całkowitego osiadania obiektu.

## 2. Opis analizowanej konstrukcji

Wiadukt będący przedmiotem analizy znajduje się w ciągu obwodnicy Lublina. Budowla składa się z płyty pomostu grubości 0,30 m, opartej na trzech belkach żelbetowych o wysokości 1,50 m, biegnących wzdłuż obiektu w rozstawie 3,5 m. Belki połączone są ze sobą poprzecznkami żelbetowymi o przekrojach 0,80x1,20 m. Całość oparto za pomocą łożysk na dwóch przyczółkach oraz pięciu podporach pośrednich. Łożyska belek skrajnych pozwalają na przesuw wielokierunkowy, a łożyska belki środkowej wzdłuż osi obiektu. Centralne łożysko zlokalizowane na środkowej podporze jest podporą stałą, bez możliwości przesuwu. Podpory pośrednie składają się z trzech słupów o średnicy 1,20 m, są zwieńczone oczepem grubości 0,80 m i posadowione na wspólnej stopie o wymiarach 5,00x15,40 m i wysokości 1,4 m.

Bezpośrednio pod fundamentami wiaduktu zalegają grunty nośne. Na rys. 1 przedstawiono warstwy gruntowe z otworu wiertniczego, zlokalizowanego w rejonie podpory P4 oraz widok gruntu w wykopie fundamentowym. Powyżej posadowienia znajdują się gliny pylaste w stanie twardoplastycznym. W poziomie posadowienia oraz na niewielkiej głębokości poniżej znajduje się zwierzelina, składająca się z części skalistych połączonych gliną pylastą w stanie twardoplastycznym. Na podstawie oceny makroskopowej podłoża w wykopie oszacowano obecność skał w granicach 20÷30%. Głębsze warstwy stanowią przewarstwienia skał miękkich, twardych oraz zwierzeliny gliniastej.

Jeżeli założymy, że pod fundamentem jest zachowany układ warstw, pokazany na rys.1, oraz, że w podłożu występuje 20% zwierzeliny gliniastej (w tym ok. 70% gliny), 60% skały miękkiej przemieszanej z niewielką ilością gliny (założmy, że około 30%) i około 20% skały twardej, to można szacować, że w podłożu do głębokości 10m występuje około 30% gliny i 70% skały.



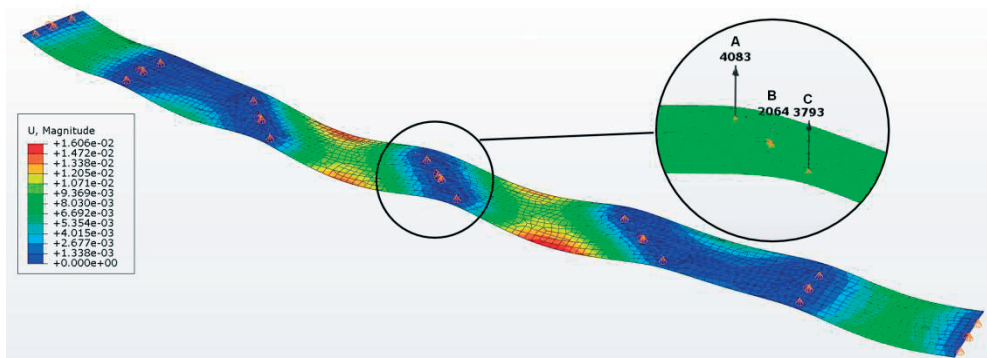
Rys. 1. Warunki gruntowe pod analizowanym wiaduktem: a) uwarstwienie podłoża, b) widok podłoża w wykopie fundamentowym

### 3. Analiza numeryczna

W celu wyznaczenia osiadań przeprowadzono analizę numeryczną wiaduktu. W pierwszym etapie stworzono model ustroju nośnego. Płytę pomostu zamodelowano elementem płytowym, natomiast belki nośne oraz poprzecznice elementami prętowymi. Do tak stworzonej konstrukcji przypisano warunki brzegowe blokujące możliwość przesuwu zgodnie z zastosowanymi łożyskami. Stworzono kroki obliczeniowe, w których dodawano kolejno obciążenia od: ciężaru własnego ustroju nośnego, nawierzchni jezdni oraz wyposażenia wiaduktu. W wyniku obliczeń otrzymano reakcje podporowe w kolejnych fazach budowy, które następnie posłużyły do wyznaczenia obciążenia rozłożonego na górnej powierzchni oczeplu słupa (Tab.1).

Tabela 1. Reakcje z płyty pomostu przekazywane na podporę P4

Krok obliczeniowy	Reakcja [kN]			Obciążenie powierzchniowe [kPa]		
	Słup A	Słup B	Słup C	Słup A	Słup B	Słup C
PŁYTA	3231	2159	2971	2859	1910	2628
NAWIERZCHNIA	3726	1896	3447	3296	1677	3050
WYPOSAŻENIE	4083	2061	3793	3612	1823	3355



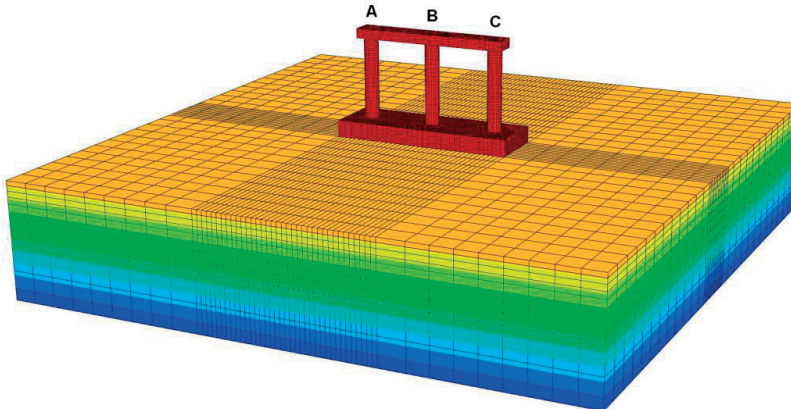
Rys. 2. Mapa bitowa przemieszczeń [m] płyty pomostu i szczegół z reakcjami na podporze P4.

W drugim etapie analizy wydzielono środkową podporę obiektu P4 i stworzono jej model numeryczny wraz z podłożem gruntowym zalegającym poniżej (Rys. 3). Część betonową zamodelowano za pomocą prostokątnych, ośmiowęzłowych elementów bryłowych C3D8R o długości boku 0,214 m i przypisano im właściwości sprężyste betonu C30/37, przyjmując moduł sprężystości  $E=34,6$  GPa.

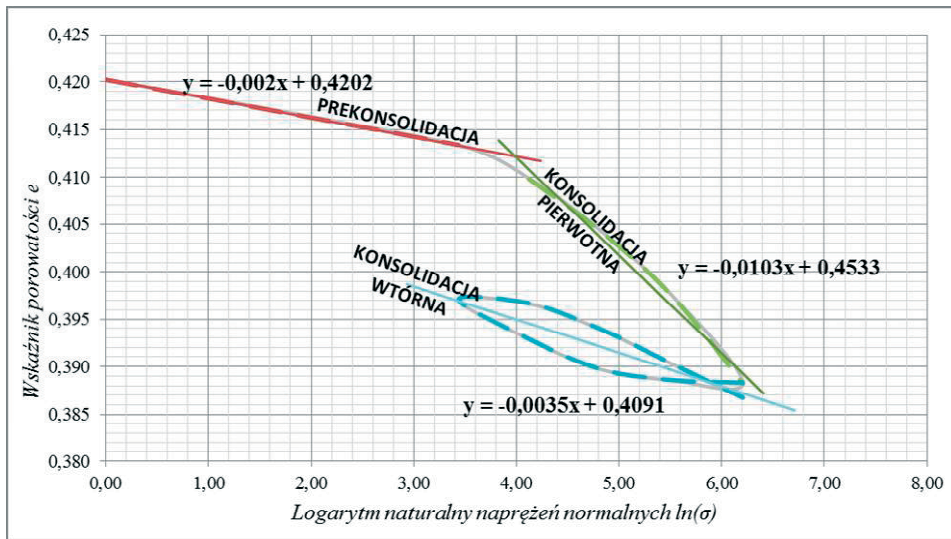
Podłoże gruntowe zamodelowano jako bryłę o wymiarach 50x50 m w planie oraz 10 m głębokości, co odpowiada dwóm szerokościom fundamentu. Zastosowano prostokątne elementy dwudziestowęzłowe C3D20R o zmiennej długości boku w zakresie 0,428÷2,50 m wg zasad zaproponowanych w [1] i [2]. Podłoże zdefiniowane zostało za pomocą konstytutywnego modelu Cam Clay (por. [1, 2, 3, 4]). Przyjęte do obliczeń parametry modelu wyznaczone zostały na podstawie laboratoryjnych badań ścisłości gruntu. Badania przeprowadzono na próbce gliny pylastej o nienaruszonej strukturze pobranej bezpośrednio z wykopu fundamentowego.

Badaną próbkę poddano obciążeniu, przykładanemu stopniowo (31, 62, 124, 248, 496 kPa). Następnie odciążono próbkę stopniowo do wartości 31,0 kPa. Po czym ponownie, również stopniowo przyłożono obciążenie aż do uzyskania obciążenia o wartości 496,0 kPa. Efektem badania były zmiany wysokości próbki w kolejnych etapach, na

podstawie których wyznaczono krzywe: prekonsolidacji, konsolidacji pierwotnej oraz konsolidacji wtórnej [5]. Wynik badań pokazano na Rys. 4. Kąt tarcia wewnętrzznego dla gliny równy  $\varphi=15^\circ$  określono na podstawie normy [6], natomiast analizując prace [7] i [8] dla skały przyjęto  $\varphi=45^\circ$ . Pozostałe niezbędne charakterystyki skał przyjęto zgodnie z badaniami opok i geźów z terenów Lubelszczyzny, przedstawionymi w pracy [9].



Rys. 3. Model metody elementów skończonych podpory P4 wraz z bryłą podłoża



Rys. 4. Krzywe konsolidacji gruntu pod fundamentem

W podłożu zalega grunt, który w poziomie posadowienia stanowi zwietrzelina gliniasta będąca mieszanką gliny i skał, oraz na większych głębokościach przewarstwień samych skał. Ze względu na występujące warunki gruntowe zdecydowano się zastosować parametry wyznaczone z badań laboratoryjnych skorygowane o właściwości skał. Niewiadomą jest procentowa zawartość gliny w podłożu w stosunku do skał. Obliczenia osiadania konstrukcji posadowionej na skałach dla naprężeń charakterystycznych, występujących pod analizowanym fundamentem (średnie około 175,0 kPa) dają znikome wartości, dlatego też w rozważanym przypadku, skałę przyjęto jako materiał nieściśliwy. Przeprowadzono

analizę, w której obliczeniom poddano model podpory wraz z podłożem opisywanym parametrami zmiennymi w zależności od przyjętej proporcji gruntu gliniastego w stosunku do materiału skalnego. Skorygowane charakterystyki wyznaczono stosując zasadę zmniejszania wyniku osiadania próbki edometrycznej i kąta tarcia wewnętrznego o wartość procentowej ilości skał w gruncie. W wyniku tego zabiegu zmieniało się nachylenie krzywych konsolidacji, a co za tym idzie parametry  $\lambda$  (nachylenie krzywej konsolidacji pierwotnej) i  $\kappa$  (nachylenie krzywej konsolidacji wtórnej). Nachylenie linii stanu krytycznego oznaczone symbolem  $M$  określono ze wzoru:

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (1)$$

Parametr  $a_0$ , mówiący o zasięgu obwiedni plastyczności, określony w [4] jako „the size of the yield surface” wyznaczono ze wzoru:

$$a_0 = \frac{1}{2} e^{\frac{e_1 - e_0 - \kappa \ln p_0}{\lambda - \kappa}} \quad (2)$$

Ostateczne parametry przyjęte do obliczeń zestawiono w tab. 2.

Warunki początkowe stanu naprężeń podłoża gruntowego zadano przyjmując naprężenia prekonsolidacji w poziomie posadowienia 53,4 kPa wyznaczone z badania edometrycznego [10]. Model podłoża obejmował jedynie grunt zalegający poniżej poziomu posadowienia. Aby odwzorować rzeczywiste warunki oraz uniknąć efektu odprężenia podłoża po pierwszym kroku obliczeniowym (Geostatic), przyjęto zastępcze naprężenie powierzchniowe równe naprężeniu prekonsolidacyjnemu.

Tabela 2. Parametry modelu Cam Clay

Zawartość gliny	Parametry modelu Cam Clay				
	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$a_0$	$p_0$
100%	0,0103	0,0035	0,572	6,852	53,4
90%	0,0092	0,0032	0,699	6,639	53,4
80%	0,0082	0,0028	0,938	6,812	53,4
70%	0,0071	0,0024	1,242	6,908	53,4
60%	0,0061	0,0021	1,542	6,741	53,4
50%	0,0051	0,0017	1,775	7,043	53,4
40%	0,0040	0,0014	1,919	6,594	53,4
30%	0,0030	0,0010	1,986	7,048	53,4
20%	0,0020	0,0007	2,009	6,599	53,4
10%	0,0010	0,0003	2,015	8,051	53,4

Analizę podzielono na pięć kroków obliczeniowych:

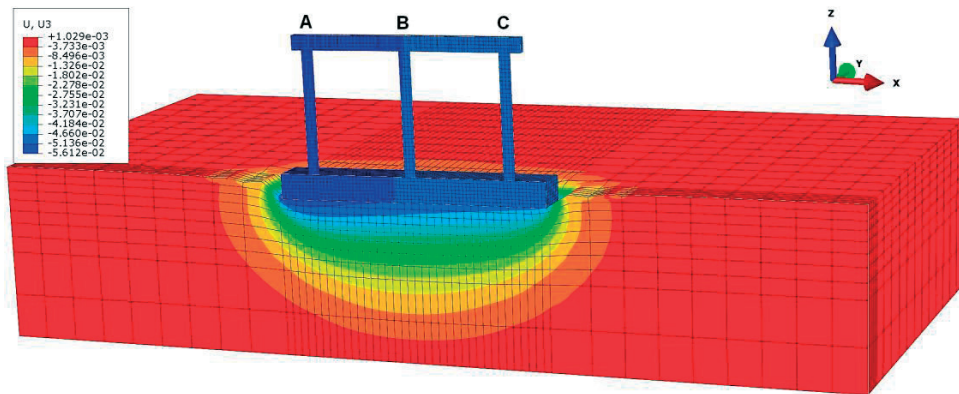
- GEOSTATIC – wprowadzenie stanu naprężeń podłoża oraz obciążenia zastępczego,
- WYKOP – zdjęcie obciążenia zastępczego z powierzchni wykopu, wprowadzenie konstrukcji podpory oraz obciążenia zasypem wykopu (założono, że konstrukcja została wzniesiona na tyle szybko, że nie dojdzie do odprężenia podłoża, stąd jednoczesne zdjęcie obciążenia gruntem z wprowadzeniem konstrukcji),
- PŁYTA – wprowadzenie reakcji z płyty pomostu w formie naprężenia powierzchniowego w miejscach usytuowania łożysk,
- NAWIERZCHNIA – zwiększenie reakcji o ciężar nawierzchni drogowej,
- WYPOSAŻENIE – zwiększenie reakcji o ciężar wyposażenia wiaduktu.



## 4. Wyniki

Rezultatem obliczeń obciążenia podpory, posadowionej na podłożu zdefiniowanym odmiennymi parametrami, były różne wartości osiadania konstrukcji. Widok mapy odkształceń podłoża gruntowego w jednym z rozważanych przypadków przedstawiono na rys. 5. Z analiz odczytano osiadania w dole części słupów i zestawiono w tab. 3÷5.

Do weryfikacji obliczeń posłużono się geodezyjnymi pomiarami osiadań [11], udostępnionymi przez generalnego wykonawcę, firmę Dragados. Umieszczenie reperów na konstrukcji oraz wykonanie pierwszych odczytów w fazie budowy dokonano po wykonaniu ustroju nośnego w lipcu 2013. W analizie numerycznej odpowiada to krokowi „PŁYTA”. Następnie po ukończeniu budowy i oddaniu obiektu do użytkowania w marcu 2014 wykonano kolejne pomiary. Dla analizowanej podpory osiadania wyniosły odpowiednio 1,3 mm dla słupa A, oraz 1,1 mm dla słupa C.



Rys. 5. Mapa przemieszczeń [m] na kierunku Z, w przekroju przez środek podpory

Porównując wyniki obliczeń z pomiarami geodezyjnymi (Rys. 6) można przyjąć, że niejednorodny grunt pod fundamentem może być zamodelowany zastępczym gruntem jednorodnym z zawartością części gliniastej w gruncie około 35%. Wyznaczona w ten sposób ilość jest zbliżona do składu oszacowanego w p.2. Jednak ocena przedstawiona w tamtym punkcie nie jest pewna, ponieważ nieznanym jest dokładny skład poszczególnych warstw. Natomiast wyniki badań potwierdzają obliczenia całego układu podłoże-grunt. Na podstawie wyników można zauważyć nierównomierne osiadanie fundamentu, co jest wynikiem różnych wartości reakcji przekazywanych na skrajne słupy. Obraz przemieszczenia konstrukcji wyznaczony w obliczeniach pokrywa się z wykonanymi pomiarami geodezyjnymi. Zarówno w obliczeniach numerycznych, jak i w pomiarach rzeczywistych osiadanie słupa A było większe w porównaniu do słupa C.

Tabela 3. Osiadanie słupa A

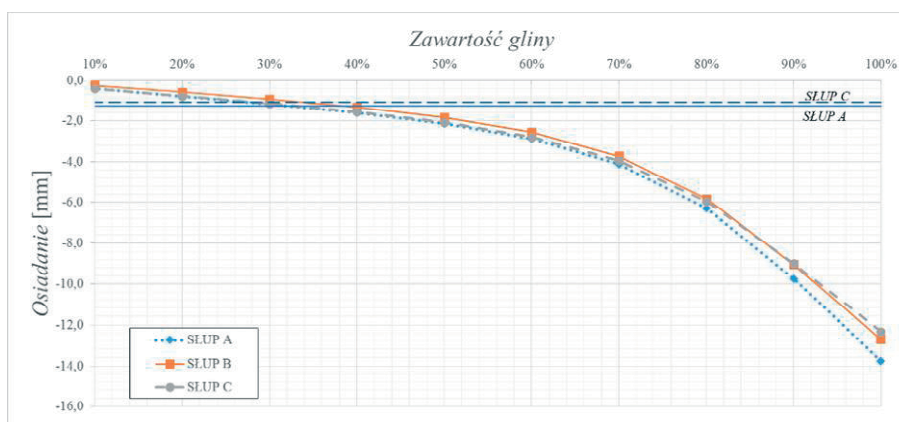
		SŁUP A									
KROK OBLICZENIOWY		100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
GEOSTATIC	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WYKOP	2	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	-0,9	-0,5
PŁYTA	3	-48,5	-41,2	-30,8	-21,4	-15,4	-11,5	-8,6	-6,3	-4,2	-2,1
NAWIERZCHNIA	4	-54,7	-45,6	-33,7	-23,3	-16,7	-12,5	-9,3	-6,8	-4,6	-2,3
WYPOSAŻENIE	5	-62,3	-51,0	-37,1	-25,5	-18,2	-13,6	-10,2	-7,5	-5,1	-2,6
ROŻNICA:	5-3	-13,8	-9,7	-6,3	-4,1	-2,9	-2,2	-1,6	-1,2	-0,8	-0,4

Tabela 4. Osiadanie słupa B

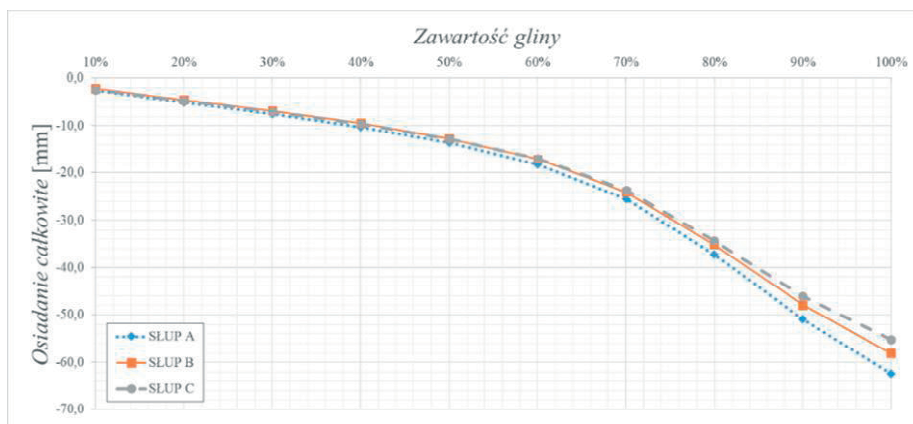
		SŁUP B									
KROK OBLICZENIOWY		100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
GEOSTATIC	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WYKOP	2	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	-0,8	-0,4
PLYTA	3	-45,4	-38,9	-29,3	-20,3	-14,6	-10,8	-8,1	-5,9	-3,9	-1,9
NAWIERZCHNIA	4	-50,9	-42,8	-31,8	-22,0	-15,6	-11,6	-8,6	-6,2	-4,1	-2,0
WYPOSAŻENIE	5	-58,1	-47,9	-35,1	-24,1	-17,1	-12,7	-9,4	-6,8	-4,5	-2,2
RÓŻNICA: 5-3		-12,7	-9,0	-5,8	-3,7	-2,6	-1,9	-1,3	-0,9	-0,6	-0,3

Tabela 5. Osiadanie słupa C

		SŁUP C									
KROK OBLICZENIOWY		100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
GEOSTATIC	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WYKOP	2	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	-0,9	-0,4
PLYTA	3	-42,9	-37,1	-28,3	-19,8	-14,3	-10,7	-8,0	-5,9	-4,0	-2,0
NAWIERZCHNIA	4	-48,3	-41,1	-31,0	-21,6	-15,5	-11,6	-8,7	-6,4	-4,4	-2,2
WYPOSAŻENIE	5	-55,2	-46,1	-34,2	-23,7	-17,0	-12,8	-9,6	-7,0	-4,8	-2,4
RÓŻNICA: 5-3		-12,3	-9,0	-6,0	-3,9	-2,8	-2,1	-1,6	-1,2	-0,8	-0,4



Rys. 6. Różnice osiadania słupów pomiędzy fazami budowy PLYTA i WYKOŃCZENIE w zależności od zawartości gliny w podłożu



Rys. 7. Całkowite osiadanie słupów w zależności od zawartości gliny w podłożu

Zakładając zgodnie z wynikami cząstkowego osiadania, że zachowanie podłoża odpowiada 35% zawartości gliny można wyznaczyć całkowite osiadanie konstrukcji. Z wykresu na Rys. 7 wynika, że wyniosło ono ok. 9 mm. Stosując się do zaleceń normy Eurokod [12], parametry podłoża Cam Clay, wyznaczone podczas analizy, mogą posłużyć jako „doświadczenie porównywane” do obliczeń konstrukcji zlokalizowanych na rozpatrywanym terenie.

Ze względu na to, że podczas klasycznego projektowania, osiadanie liczy się najczęściej na podstawie modułów ścisłości, porównano moduły oszacowane różnymi metodami. Zestawienie pokazano w tabelicy 6.

Tabela 6. Zestawienie edometrycznych modułów ścisłości

Metoda wyznaczania	Edometryczny moduł ścisłości [kPa]			
	Zakres 31÷248 kPa		Zakres 31÷496 kPa	
	$M_0$	$M$	$M_0$	$M$
Badanie edometryczne	19 440	44 438	26 198	63 342
Zastępczy – 35% gliny	55 719	128 332	75 088	181 549
Norma PN-81/B-03020 [6]*	29 401	49 011	29 401	49 011

\* w normie nie podano zakresu naprężeń dla którego obowiązuje moduł

Z przeprowadzonych przez autora w laboratorium badań edometrycznych w zakresie naprężeń 31÷496 kPa wynika, że podłoże gliniaste charakteryzuje się modułem ścisłości pierwotnej  $M_0=26198$  kPa oraz modułem ścisłości wtórnej  $M=63342$  kPa. Jednak na powierzchni bezpośrednio pod fundamentem przekazywane naprężenia rozkładają się (pomijając jednostkowe wartości ekstremalne) nierównomiernie w zakresie 100÷250 kPa, średnio 175 kPa. Z tych samych badań edometrycznych wyznaczając moduły dla zakresu 31÷248 kPa, otrzymamy  $M_0=19440$  kPa oraz  $M=44438$  kPa.

Kontynuując obliczenia tokiem postępowania korygowania parametrów gruntu o właściwości skał, opisanym w p.3 wyznaczono zastępcze moduły ścisłości. Dla podłoża zawierającego 35% gliny, moduły ścisłości w zakresie 31÷496 kPa wynoszą  $M_0=75088$  kPa oraz  $M=181549$  kPa. Dla zakresu 31÷248 kPa wynoszą  $M_0=55719$  kPa oraz  $M=128332$  kPa. Odczytując wartości z normy [6], dla konsolidacji typu „C” otrzymamy  $M_0=29401$  kPa oraz  $M=49011$  kPa.

Podsumowując, wyznaczone z badań moduły odbiegają od wartości normowych. Co prawda, dla zakresu 31÷496 kPa moduły ścisłości pierwotnej niewiele się różnią, to wyznaczony moduł ścisłości wtórnej jest większy o 30%. Natomiast dla zakresu 31÷248 kPa moduły ścisłości wtórnej różnią się niewiele, ale wyznaczony moduł ścisłości pierwotnej jest 35% mniejszy od normowego. Na podstawie tego można stwierdzić, że przyjęcie na etapie projektowania modułu z normy [6] skutkowałoby nieprawdziwym oszacowaniem osiadania.

Biorąc pod uwagę zbieżność wyników analizy numerycznej z pomiarami geodezyjnymi wyznaczono zastępczy moduł ścisłości podłoża z założeniem 35% zawartości gliny. Następnie na jego podstawie wyznaczono osiadanie metodą normową [6] z założeniem aktywnego podłoża do głębokości na której naprężenia dodatkowe są mniejsze od 20% (wg [12]) oraz od 30% (wg [6]) naprężeń pierwotnych. W pierwszym przypadku osiadanie wyniosło 11,2 mm, natomiast w drugim 9,4 mm. Oszacowane w ten sposób wartości są zbliżone do osiadania wyznaczonego z analizy numerycznej. Autor uważa, że tak oszacowane osiadanie jest poprawniejszym rozwiązaniem niż korzystanie z modułów normowych [6].



## 5. Podsumowanie i wnioski

Mimo braku możliwości dokładnego zweryfikowania rozpoznania gruntu na głębokości, a co z tym jest związane z rozpoznaniem parametrów mechanicznych wielu warstw i następnie wprowadzenie ich do modelu numerycznego, autor uważa przyjęcie podłoża jednorodnego o zastępczych właściwościach za rozwiązanie poprawne. Dodatkowo, wyznaczony zastępczy moduł ściśliwości może służyć w przyszłości do szacowania osiadania metodą normową w zbliżonych warunkach gruntowych.

Stosowanie zaawansowanych modeli gruntowych w obliczeniach projektowych skutkuje otrzymywaniem wyników obliczeniowych coraz bardziej zbliżonych z rzeczywistym zachowaniem konstrukcji. Przyjęcie odpowiednich charakterystyk podłoża jest kluczowym elementem analiz. Oprócz laboratoryjnych badań gruntu nieodłącznym elementem procesu modelowania podłoża powinna być wiedza uzyskana z analiz porównywanych obiektów posadowionych w zbliżonych warunkach gruntowych. Parametry uzyskiwane z wykorzystaniem analizy wstecznej zaliczają się do jednych z lepszych metod projektowych. Zaproponowana metoda modelowania zastępczego gruntu jednorodnego oraz dobór jego parametrów może być stosowana do analizy osiadania w całym procesie wznoszenia i użytkowania konstrukcji oraz pracy statycznej tego obiektu. Dalszym etapem prac jest stworzenie modelu całego wiaduktu oraz obliczenia z wykorzystaniem wyznaczonych parametrów.

## Literatura

- 1 Capasso G., Mantica S. Numerical Simulation of Compaction And Subsidence Using ABAQUS. ABAQUS Users' Conference 2006.
- 2 Hugel H.M., Henke S., Kinzler S., High-performance Abaqus simulations in soil mechanics. ABAQUS Users' Conference 2008.
- 3 Lechowicz Z., Szymański A. Odształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. cz. II Metodyka Obliczeń. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2002
- 4 Abaqus analysis User's Manual, vol 3., Simulia, 2009
- 5 Helwany S. Applied soil mechanics with ABAQUS Applications. John Wiley & Sons, 2007.
- 6 PN-81/B-03020 Grunty budowlane - Posadowienie bezpośrednie budowli - Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 7 Pinińska J. Właściwości geomechaniczne opok. Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 1 (2008)
- 8 Podręcznik użytkownika GEO 5, wersja 5.9, Fine Ltd. 2009, s.293-301.
- 9 Santera U. Kąt tarcia wewnętrznego i spójność skał zwięzłych i spękanych. Warsztaty „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, 2002, 393-404.
- 10 Britto A. 1 Dimensional Consolidation. University of Cambridge Help, 2013.
- 11 Raport z geodezyjnych pomiarów osiadań obiektu W-21 w km 0+340,85 łącznicy J6 nad projektowaną drogą S-17, marzec 2014.
- 12 PN-EN 1997-1 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.

## **The verification of subsoil parameters based on back analysis of a bridge**

**Krzysztof Nepelski**

*Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin  
University of Technology, e-mail: k.nepelski@pollub.pl*

**Abstract:** The paper presents the analysis of foundation of the road bridge. The numerical calculation of the bridge abutment was made in FEM Software with subsoil modelled as solid defined by Cam Clay model. Number of calculations was made by using variable parameters of soil. Results were compared with geodetic measurements. Soil properties designated by lab test and geological boreholes, were verified with computer back analysis results.

**Keywords:** foundation design, Cam Clay, subsoil, back analysis.