

## **Projektowanie geotechniczne w warunkach występowania pokryw lessowych Płaskowyżu Nałęczowskiego**

**Lucjan Gazda<sup>1</sup>, Małgorzata Franus<sup>2</sup>**

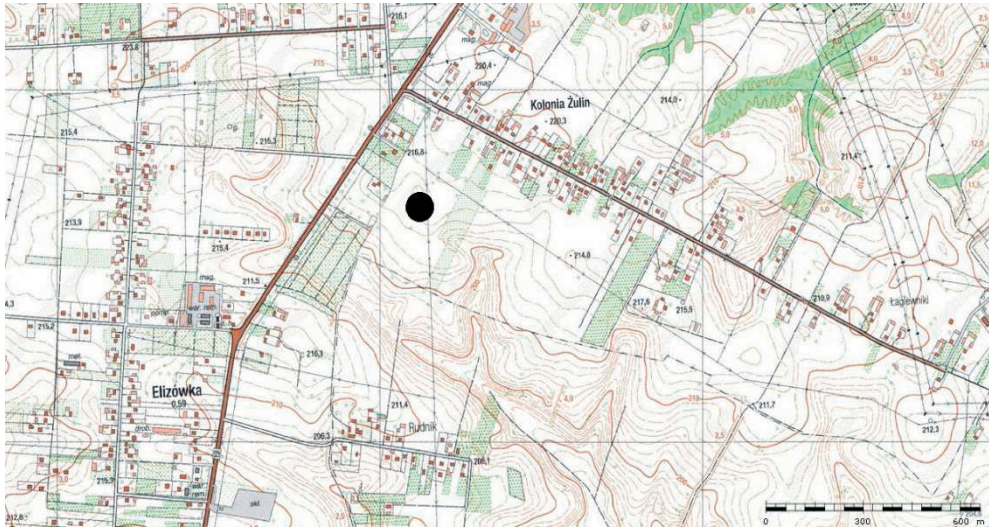
*Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: <sup>1</sup>l.gazda@pollub.pl, e-mail: <sup>2</sup>m.franus@pollub.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę rozpoznania i rozwiązań projektowych posadowienia wiaduktu drogowego w warunkach występowania zwartej pokrywy lessów Płaskowyżu Nałęczowskiego. Analizy dokonano w odniesieniu do ustaleń i wymogów zapisów Eurokodu 7: Projektowanie geotechniczne. Wskaźnikowo wykonano badania wybranych cech fizycznych i mechanicznych próbek gruntów pobranych w trakcie wykonywania posadowienia obiektu. W świetle wykonanych badań ustalono bardzo ostrożne określenie parametrów obliczeniowych i przyjęcie jako wiodącego stanu granicznego wynikającego z samego pojęcia less i jego wrażliwości strukturalnej, bez ustalenia parametru osiadania zapadowego ( $i_{mp}$ ) lub/i wartości naprężenia uplastyczniającego (YSR). Rozwiązania projektowe posadowienia wynikające z rozpoznania, ustalonych parametrów i właściwości podłoża uznano za bardzo ostrożne i kosztowne.

**Słowa kluczowe:** less, zapadowość, projektowanie geotechniczne.

### **1. Wprowadzenie**

Less jest pylastym osadem eolicznym o specyficznych właściwościach strukturalno-mineralnych, które skutkują dużą wrażliwością na działanie wody oraz przemiennością parametrów mechanicznych (wytrzymałościowych i odkształceniowych) w funkcji wilgotności [1, 2, 3]. Płaskowyż Nałęczowski stanowi naturalne wydzielenie fizjograficzne (mezoregion) Wyżyny Lubelskiej o powierzchni 615 km<sup>2</sup>. Pokryty jest grubą (do 25-30 m, średnio 15 m) warstwą lessów rozciętych dolinami rzecznyymi i wązozami. Rozciąga się pomiędzy dolinami Wisły i Bystrzycy w kierunku WNW - ESE. Wznosi się do 200–230 m n.p.m. a deniwelacje wynoszą kilkadziesiąt metrów. Lessy Płaskowyżu Nałęczowskiego należą do lessów młodszych górnych (złodowacenie północnopolskie), tzw. właściwych, wysoczyznowych. Wykazują one w profilu pionowym zmienność strukturalną i mineralną, która pozwala na wyróżnienie min. 3 poziomów [4, 5]. Wykształcone są jako pyły, gliny pylaste lub pyły i gliny piaszczyste (twory lessopodobne). Odmiany bardziej zwięzłe (gliny) są efektem postsedymentacyjnych modyfikacji wietrzeniowych lub synsedymentacyjnych procesów aluwialnych, deluwialnych i soliflukcyjnych. Powierzchniowa część pokrywy lessowej (poniżej glin pylastych profilu wietrzeniowego) wykształcona jest w facji eolicznej (pył), tzw. subaeralnej, do głębokości 8 - 10 m od powierzchni. Występowanie pokryw lessowych i silnie rozwinięta morfologia stwarzają określony zespół utrudnień geologiczno - inżynierskich w projektowaniu, wykonawstwie i eksploatacji posadowień obiektów budowlanych oraz wykopów i nasypów. W artykule poddano wstępnej ocenie dokumentację projektową i realizację fragmentu jednego z obiektów mostowych obwodnicy Lublina w m. Elizówka w ciągu drogi ekspresowej S17. Obiekt zlokalizowany jest w północno-zachodniej części Płaskowyżu Nałęczowskiego, w jego wysoczyznowej, wyrównanej morfologicznie powierzchni w znacznym oddaleniu od dolin rzecznych i rozwiniętych aktywnych form wązozowych (rys. 1).



Rys. 1. Położenie i morfologia rejonu analizowanego obiektu.

### 1.1. Specyfika lessów jako podłoża budowlanego

Lessy są to grunty mało spoiste (pyły), rzadziej średniospoiste (gliny pylaste) i sporadycznie zwięzłe spoiste (gliny pylaste zwięzłe). Występują one przy małej wilgotności w stanie półzwardym, przy wyższej w stanie plastycznym. Zmiany konsystencji lessów (grunty mało- i półprzepuszczalne) związane są głównie z sezonowymi i wieloletnimi warunkami infiltracji, ograniczone maksymalnie do głębokości 2 - 3 m. Zmiany uwilgotnienia powodują duże zmiany cech wytrzymałościowo-deformacyjnych. W stanie zwardym, półzwardym i twaroplastycznym lessy (zarówno pyły i gliny pylaste) charakteryzują się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi oraz niewielką ściśliwością i stanowią korzystne podłoże budowlane. W warunkach znacznego (i nagłego) nasycenia wodą często następuje szybka redukcja ich objętości, która określana bywa terminem osiadania zapadowego. Cechę tą wykazują niektóre lessy. Wg [6, 7] o zapadowości decyduje dominujący udział frakcji pylastej (mało frakcji ilastej i koloidalnej, co nadaje im strukturę szkieletową), wysoka wapnistość (lessy zapadowe wykazują wapnistość powyżej 5 %) i zasolenie ogólne oraz niska wilgotność naturalna (niższa od granicy plastyczności). Lessy o wysokiej wilgotności wykazują dużą ściśliwość i brak zdolności osiadania zapadowego [8]. Przyjmuje się [9], że lessy zapadowe charakteryzują się wilgotnością naturalną mniejszą od 6%, a o wilgotności powyżej 19% o strukturze trwałej.

## 2. Rozpoznanie geotechniczne i rozwiązanie posadowienia

W ramach rozpoznania wykonano otwory o głębokości 20 m przewiercające cały profil lessów. Wykonane w rejonie projektowanego obiektu otwory charakteryzowały się powtarzalnymi profilami (do gł. 15 – 17 m grunty lessopodobne i poniżej do gł. 20 m gliny glacialne), co wskazuje na dużą jednorodność w pionie i horyzontalnie profilu lessowego oraz niżej leżących gruntów glacialnych. W wykonanych otworach nie stwierdzono występowania poziomów wodonośnych. Jeden z profili przedstawiono na rys. 2. W ramach dokumentowania geologiczno - inżynierskiego dokonano opisu makroskopowego przewierconych warstw i na podstawie ustalonego rodzaju gruntów i jego stanu wydzielono warstwy geotechniczne (na podstawie PN-88/B-02480) oraz przypisano im parametry obliczeniowe (rys.3).



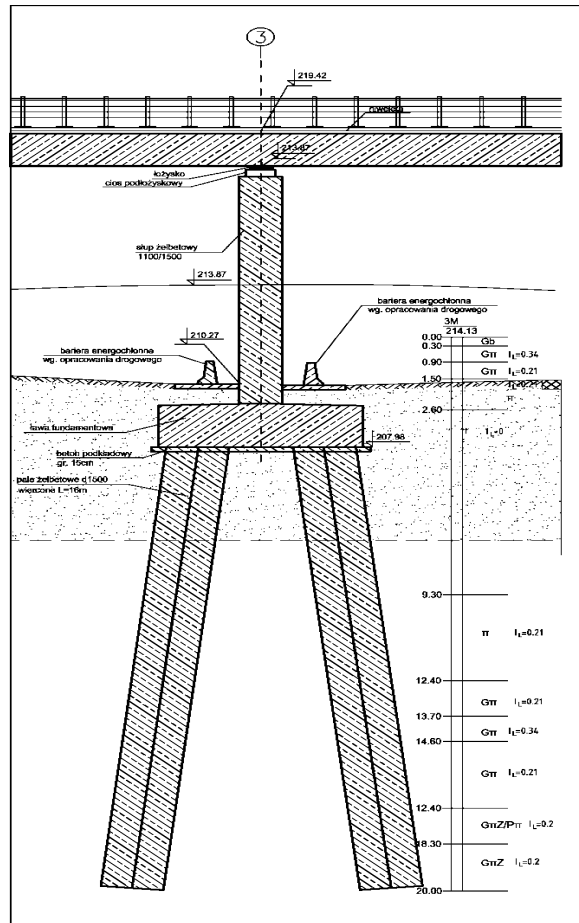
Objaśnienia geologiczne		Profil stratygraficzno-genetyczno-litoliczny	Symbol gruntu i geneza	Oznaczenia	Typy litologiczne osadów	Numer warstwy geologiczno-litologicznej	Symbol gruntu wg PN-86/B-02480	Symbol geologiczny konsolidacji gruntu	Symbol gruntu		Wilgotność naturalna [%]	Gęstość objętościowa [t/m <sup>3</sup> ]	Spójność [kPa]	Kąt tarcia wewnętrzny [°]	Edometryczny moduł ściśliwości		Moduł odkształcenia			
									Stopień zagęszczenia	Stopień płynności					M <sub>0</sub>	M	E <sub>0</sub>	E	I <sub>uv</sub>	
								I <sub>D</sub>	I <sub>L</sub>	w <sub>n</sub>	φ	c <sub>u</sub>	φ <sub>u</sub>	M <sub>0</sub>	M	E <sub>0</sub>	E	I <sub>uv</sub>		
						Gb		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Holocen		OSADY RZECZNO-ZASTOSKOWE		Q <sub>h</sub>	Mady		la	Gπ+KW	C	-	0.20 γ <sub>n</sub> =0.8	22.0 γ <sub>n</sub> =0.8	2.09 γ <sub>n</sub> =0.9	17 γ <sub>n</sub> =0.9	15 γ <sub>n</sub> =0.9	21000 γ <sub>n</sub> =0.9	-	18000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	
							lb	Gπ,GπH, Gπ+KW	C	-	0.36 γ <sub>n</sub> =0.9	25.9 γ <sub>n</sub> =0.9	1.95 γ <sub>n</sub> =0.8	12 γ <sub>n</sub> =0.9	13 γ <sub>n</sub> =0.8	15500 γ <sub>n</sub> =0.9	-	14000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
							lc	Gπ,GπH	C	-	0.65 γ <sub>n</sub> =1.1	34.0 γ <sub>n</sub> =0.9	1.88 γ <sub>n</sub> =0.8	6 γ <sub>n</sub> =0.9	8 γ <sub>n</sub> =0.9	9200 γ <sub>n</sub> =0.9	-	8000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
Plejstocen		OSADY EOLICZNE		Q <sub>p</sub>	Utwory lessopodobne		IIla	Gπ,II	C	-	<0 γ <sub>n</sub> =0.9	18.7 γ <sub>n</sub> =0.9	2.10 γ <sub>n</sub> =0.8	29 γ <sub>n</sub> =0.9	17 γ <sub>n</sub> =0.9	32500 γ <sub>n</sub> =0.8	-	32000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	
							IIlb	Gπ,II,IIp,Pg,GπH, Gp,Gp/Pd,Gπ+KW	C	-	0.21 γ <sub>n</sub> =0.9	23.0 γ <sub>n</sub> =0.9	2.05 γ <sub>n</sub> =0.9	16 γ <sub>n</sub> =0.9	14 γ <sub>n</sub> =0.9	25000 γ <sub>n</sub> =0.9	-	19000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
							IIlc	Gπ,GπH,Gp,Pg	C	-	0.34 γ <sub>n</sub> =0.8	25.3 γ <sub>n</sub> =0.9	1.96 γ <sub>n</sub> =0.9	12 γ <sub>n</sub> =0.9	13 γ <sub>n</sub> =0.9	15800 γ <sub>n</sub> =0.9	-	14000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
		OSADY GLACJALNE I FLUWIOGLACJALNE		Q <sub>p</sub>	Gliny zwałowe		IVa	Gπz	C	-	<0 γ <sub>n</sub> =0.8	20.1 γ <sub>n</sub> =0.9	2.12 γ <sub>n</sub> =0.8	28 γ <sub>n</sub> =0.9	18 γ <sub>n</sub> =0.9	34500 γ <sub>n</sub> =0.9	-	32000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	
							IVb	Gπz,Gπz+Z,Gπz/Pπ, Gπ,Gp,Pg	C	-	0.20 γ <sub>n</sub> =0.9	20.0 γ <sub>n</sub> =0.8	2.12 γ <sub>n</sub> =0.9	17 γ <sub>n</sub> =0.9	15 γ <sub>n</sub> =0.9	28500 γ <sub>n</sub> =0.9	-	20000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
							IVc	Gπ,Gπ/Pd,GπH,Gp, Pg	C	-	0.33 γ <sub>n</sub> =0.9	21.2 γ <sub>n</sub> =0.8	2.03 γ <sub>n</sub> =0.8	13 γ <sub>n</sub> =0.9	13 γ <sub>n</sub> =0.9	20000 γ <sub>n</sub> =0.9	-	14000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
							Va	Pd+π,Pd+π+G,PdH, PdH+G,PdH+Z	-	0.29 γ <sub>n</sub> =0.9	-	30.1 γ <sub>n</sub> =0.9	1.85 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	29 * γ <sub>n</sub> =1.1	4200 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	21000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-
Vb	Pd+π,Pπ+π,Pd//Gp, Pd+G,Pd+π+G	-	0.45 γ <sub>n</sub> =0.9	-	25.9 γ <sub>n</sub> =0.9	1.90 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	29 * γ <sub>n</sub> =1.1	54000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	38000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-							
Vc	Ps,Ps+G,Ps+G+Z, Ps+π	-	0.47 γ <sub>n</sub> =0.9	-	22.0 γ <sub>n</sub> =0.9	2.00 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	33 * γ <sub>n</sub> =1.1	54000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	75000 * γ <sub>n</sub> =1.1	-	-							

Rys. 3 Zestawienie właściwości fizycznych i parametrów obliczeniowych ustalonych na potrzeby projektowania.

Zarówno lessy jak i gliny zwałowe zakwalifikowano jako grunty spoiste nieskonsolidowane (C) (rys. 3), co wydaje się nie do końca uprawnione ze względu na pozycję glin zwałowych w profilu i historię rozwoju budowy geologicznej tej części Płaskowyżu Nałęczowskiego. Ustalone parametry obliczeniowe (gęstość objętościowa, spójność, kąt tarcia wewnętrzny, edometryczny moduł ściśliwości i moduł odkształcenia) dla gruntów potencjalnej strefy posadowienia bezpośredniego (warstwa III a) i pośredniego (warstwa IV b) są do siebie bardzo zbliżone, a wręcz wszystkie poza nieistotną różnicą gęstości objętościowej (2,10 t/m<sup>3</sup> lessu i 2,12 t/m<sup>3</sup> gliny zwałowej) są korzystniejsze dla lessu (warstwa III a). W dokumentacji nie ustalono ilościowo parametrów trwałości struktury lessu (osiadanie zapadowe).

W świetle wykonanych badań przyjęto jako wiódący stanu graniczny wynikający z samego pojęcia less i jego potencjalnej wrażliwości strukturalnej, bez ustalenia parametru osiadania zapadowego ( $i_{mp}$ ) lub/i wartości naprężenia uplastyczniającego (YSR).

Obiekt w całości posadowiono pośrednio na palach wierconych  $\Phi$  150 i 120 cm, pionowych w strefie przyczółków i skośnych w strefie podpór (rys. 4). W projekcie nie przewidziano także wykorzystania gruntu lessowych z wykopów do formowania nasypów.



Rys. 4. Rozwiązanie posadowienia podpory wiaduktu w rejonie dokonanej rozpoznania.

### 3. Badania wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych

W trakcie wykonywania pali wierconych i wykopu fundamentowego jednej z przypór wiaduktu pobrano próby do badań wybranych cech fizycznych i mechanicznych lessów. Z cech fizycznych, istotnych do określenia potencjalnej zapadowości lessów określono wilgotność oraz zawartość węglanów wapnia (PKN-CEN ISO/TS 17892-2 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne - Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego). Wyniki zestawiono w tabeli 1.



Tabela 1. Wilgotność i zawartość węglanów w profilu podłoża wiaduktu

Lp.	Głębokość [m]	Wilgotność [%]	Zawartość CaCO <sub>3</sub> [%]
1	2	11,9	<5
2	3	11,4	<5
3	5	11,9	<5
4	7	12,4	<5
5	8	12,3	<5
6	9	13,5	<5
7	10,5	17,1	<5
8	12	20,1	<5
9	12,5	15,6	<5
10	13	15,3	<5
11	14	18,3	<5
12	15	14,0	brak
13	16	21,6	brak
14	17	19,1	<3
15	17,5	19,0	brak

Badania wilgotności wykonano dla próbek pobranych z głębokości poniżej 2 m, która w tych warunkach morfologicznych i klimatycznych wyznacza potencjalną granicę sezonowych, a nawet wieloletnich zmian wilgotności związanych z infiltracją i parowaniem. Do gł. 9 m w profilu wilgotność jest niższa od 15% (11,9 – 13,5 %). Poniżej lessy są silniej uwilgotnione, max. do 21,6 %. Bardziej monotennie w profilu rozkładają się węglany (kalcyt). Less do głębokości 14 m jest węglanowy (do 5% CaCO<sub>3</sub>), poniżej bezwęglanowy lub z obniżoną zawartością węglanów (gł. 17 m). Rozkład zmienności wilgotności w profilu pionowym w znacznym stopniu jest zapewne efektem odmienności strukturalno – mineralnej (uziarnienie, zawartość i rodzaj minerałów ilastych). Rozkład wilgotności nie koreluje się z zawartością węglanów. Na podstawie wilgotności i zawartości węglanów można stwierdzić, że w profilu wykonanego posadowienia nie stwierdza się występowania zdecydowanie zapadowych lessów. Oczywiście weryfikacja tego wyводу wymagałaby wykonania stosownych badań, których przed podjęciem decyzji projektowych nie wykonano.

Badania wytrzymałości na ścinanie wykonano dla prób pobranych z głębokości 5 m, 8 m i 17 m. Badania wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania zgodnie normą PKN-CEN ISO/TS 17892 - 10 „Badania geotechniczne - Badania laboratoryjne gruntów - Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania”. Pomiary przeprowadzono w skrzynkach o rozmiarach 60X60X60 mm, w warunkach wstępnej konsolidacji prób NNS (gł. 5 m) i NW (gł. 8 i 17 m) bez odpływu wody w czasie ścinania (CU), przy naprężeniach normalnych 120, 170 i 229 kPa. Obciążenie konsolidujące było jednakowe dla wszystkich próbek gruntu. Za umowne zakończenie konsolidacji przyjęto tę chwilę, gdy różnica wysokości próbki nie przekroczyła 0,005 mm przy dwu kolejnych odczytach na czujnikach w odstępie czasu równym nie mniej niż 6 godzin. Jako wytrzymałość  $\tau_f$  badanych próbek na ścinanie przyjęto alternatywnie maksymalną wartość naprężeń ścinających  $\tau_{max}$  jaka wystąpiła w procesie ścinania próbki. Wynikiem badań jest uzyskanie par wartości  $\tau_{max}$  oraz  $\varphi$  i dla każdej ściętej próbki, które naniesiono na wykres w celu wykreślenia prostej odpowiadającej hipotezie Coulomba i określenia kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$  [°] oraz spójności  $c$  [kPa] gruntów.

Uzyskane wyniki kąta tarcia wewnętrznego i spójności zestawiono w tabeli 2. Podczas ścinania próbek zaobserwowano osiągnięcie maksymalnej wartości składowych naprężenia stycznego (wytrzymałości na ścianie) w zakresie od 80,5 do 272,25 kPa.

Tabela 2. Wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$  [°] i spójności  $c$  [kPa] badanych gruntów lessowych

Lp.	Głębokość próbki [m]	$\varphi$ [°]	$c$ [kPa]	Wilgotność naturalna[%]	Zawartość CaCO <sub>3</sub> [%]
1	5 (orientacja horyzontalna)	29,5	11	11,9	<5
2	5 (orientacja wertykalna)	29,5	35	11,9	<5
3	8	33,8	14	12,3	<5
4	17	34,4	9,8	19,1	<3

Wartości kąta tarcia wewnętrznego próbek pobranych z głębokości 5 m nie zależą od kierunku badań i wynoszą ok. 29° natomiast wartości spójności wykazują wyraźną anizotropię. Dla próbek orientowanych horyzontalnie spójność wynosi 11 kPa, natomiast dla orientowanych wertykalnie 35 kPa. Przy statystycznie równomiernym rozłożeniu ziaren lessu, które decydują o kącie tarcia wewnętrznego, należy wnioskować, że o spójności decydują zorientowane postsedymentacyjnie (diagenetycznie) wiązania koloidalne (minerały ilaste, tlenki żelaza) i cementacyjne (kalcyt).

W profilu pionowym wartość kąta tarcia wewnętrznego jest bardzo zbliżona z lekką tendencją wzrostową wraz z głębokością, co jest zapewne efektem naprężeń geostatycznych (diagenetyczna orientacja i upakowanie ziaren).

#### 4. Zamiast podsumowania - niepokoje projektowania geotechnicznego w podłożu lessowym

W zapisach ogólnych Eurokodu 7 stwierdza się, że badania geotechniczne powinny w sposób wiarygodny określić układ przestrzenny i właściwości całego podłoża istotnego dla planowanego obiektu lub podlegającego wpływom planowanych robót. W warunkach występowania pokryw lessowych Płaskowyżu Nałęczowskiego w jego partiach wierzchowinowych (prosta i przewidywalna budowa geologiczna, brak oddziaływań erozji wąwozowej) ta część projektowania geotechnicznego wydaje się być stosunkowo prostą. Jak się zakłada, rozpoznanie podłoża ma większe znaczenie niż dokładność modeli obliczeniowych i przyjmowanych współczynników częściowych. Model obliczeniowy powinien opisywać przewidywane zachowanie podłoża gruntowego w rozpatrywanych stanach granicznych. Zaleca się, by stany graniczne związane z powstaniem stanu zniszczenia w podłożu gruntowym można było łatwo sprawdzić z użyciem modelu obliczeniowego. I ten element projektowania w przypadku podłoża lessowego wydaje się być zdecydowanie bardziej skomplikowany z uwagi na anizotropię tego ośrodka (np. wykazana kierunkowo zmienna spójność), a przede wszystkim z jego nieprzewidywalnością wynikającą z wrażliwości strukturalnej (osiadanie zapadowe). Nieprzewidywalność tego stanu granicznego (przy braku stosownych badań) dla obiektów min. 2 kategorii geotechnicznej rozwiązuje się najczęściej pośrednim fundamentowaniem oraz wyłączeniem tych gruntów z wykorzystania do formowania nasypów. Bez wątpienia zwiększa to zdecydowanie bezpieczeństwo budowli, lecz znacznie komplikuje i podnosi koszty wykonania.

#### Literatura

- 1 Malinowski J. Badania geologiczno-inżynierskie lessów. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1971.
- 2 Myślińska E. Laboratoryjne badania gruntów. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- 3 Borowczyk M., Frankowski Z. Zmienność właściwości geotechnicznych lessów w świetle współczesnych metod badań. Kwartalnik Geologiczny 23/2 (2007) s. 447-459.
- 4 Maruszczak H. Zróżnicowanie stratygraficzne lessów w Polsce. Podstawowe profile lessów w Polsce. Wyd. UMCS, Lublin 1991 s. 13-35.
- 5 Harasimiuk M., Henkiel A. Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, arkusz Lublin. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1982 s. 50-53.

- 6 Malinowski J. Badania geologiczno-inżynierskie lessów. Wyd. Geol. Warszawa 1971.
- 7 Grabowska-Olszewska B. Engineering-geological problems of loess in Poland. Engineering Geology 25 (1988).
- 8 Myślińska E. Ściśliwość i zapadowość lessów. Technika Poszukiwań Geol. 5-6 (1984).

## **Geotechnical design in the presence of loess cover of the Nałęczów Plateau**

**Lucjan Gazda<sup>1</sup>, Małgorzata Franus<sup>2</sup>**

*Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: <sup>1</sup> l.gazda@pollub.pl, <sup>2</sup> m.franus@pollub.pl*

**Abstract:** An analysis of the diagnosis and design solutions of road viaduct foundation in the presence of dense loess cover of the Nałęczów Plateau. The analysis was conducted with regard to the provisions and the requirements of Eurocode 7 regulations: Geotechnical design. Studies on selected physical and mechanical characteristics of soil samples taken at the time of the object foundation were performed with the use of index analysis. In the light of the tests, parameters defined very carefully were established, and the leading borderline state resulting from the very term loess and its structural sensitivity was adopted without establishing the parameter of collapse settlement ( $i_{mp}$ ) or/and the value of yield stress (YSR). Design solutions of foundation resulting from the recognition, settled parameters and properties of the substrate were reconsidered to be as very careful and expensive.

Keywords: loess, collapsing, geotechnical design