

dr inż. Wanda Kokoszka¹⁾
ORCID: 0000-0003-0486-9881

Ocena właściwości zapadowych lessowego podłoża gruntowego

Assessment of the collapsing properties of the loess subsoil

DOI: 10.15199/33.2022.11.35

Streszczenie. Atrakcyjność gospodarcza i turystyczna obszarów lessowych sprawia, że są one intensywnie wykorzystywane w celu realizacji inwestycji budowlanych, zarówno kubaturowych, jak i liniowych. Warunki podłoża budowlanego z utworów lessowych są jednak uznawane za niekorzystne przede wszystkim z powodu dużej wrażliwości na zmiany zawilgocenia. W pracy przedstawiono problematykę procesów deformacyjnych w tych gruntach z uwzględnieniem analizy mikrostrukturalnej. Przeanalizowano zastosowanie wybranych kryteriów pośrednich i bezpośrednich do oceny właściwości zapadowych na przykładzie badania lessów z rejonu Rzeszowa.

Słowa kluczowe: less; wskaźnik zapadowości; porowatość; budowa mikrostrukturalna.

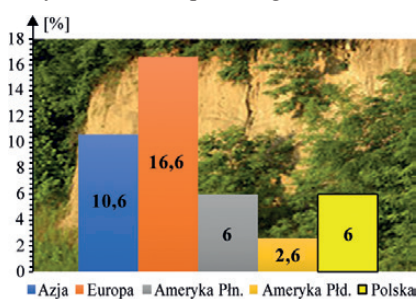
Abstract. The economic and tourist attractiveness of loess areas means that they are intensively used for construction investments, both cubature and linear. However, the conditions of the construction substrate made of loess formations are considered unfavorable mainly due to high sensitivity to changes in moisture. The paper presents the problems of deformation processes in these soils, taking into account the microstructural analysis. The application of selected direct and indirect criteria for the assessment of collapsing properties has been analyzed on the example of loess research in the Rzeszów region.

Keywords: loess; collapsing coefficient; porosity; microstructure.

Pokrywy lessowe zajmują na świecie ok. 6% powierzchni lądów (rysunek 1) [1]. Utwory lessowe uznawane są w geologii inżynierskiej za „grunty słabe” ze względu na dużą wrażliwość na działanie wody i skłonność do gwałtownej utraty wytrzymałości w określonych warunkach zawilgocenia. Analiza obszarów występowania pokryw lessowych w Polsce i na świecie oraz badania paleogeograficzne na tych terenach dowodzą, że ludzie od dawna dostrzegali walory tego środowiska, takie jak dogodne warunki topograficzne, wilgotnościowe, klimatyczne, glebowe i obronne [2]. Z tego powodu wysoczyzny lessowe były od wieków bardzo chętnie wykorzystywane jako miejsca lokowania miast (fotografia 1). Osadnictwu sprzyjała możliwość drążenia w masywie lessowym podziemnych tuneli i mieszkań, przede wszystkim w warunkach klimatu kontynentalnego.

Procesy deformacyjne (erozja liniowa i powierzchniowa, zapadowość, ruchy osuwiskowe) i ich skutki zajmują czołową pozycję w badaniach lessów. Problematyka ta jest najczęściej rozpatrywana w nawiązaniu do oddziaływania wód spływowych i infiltracji.

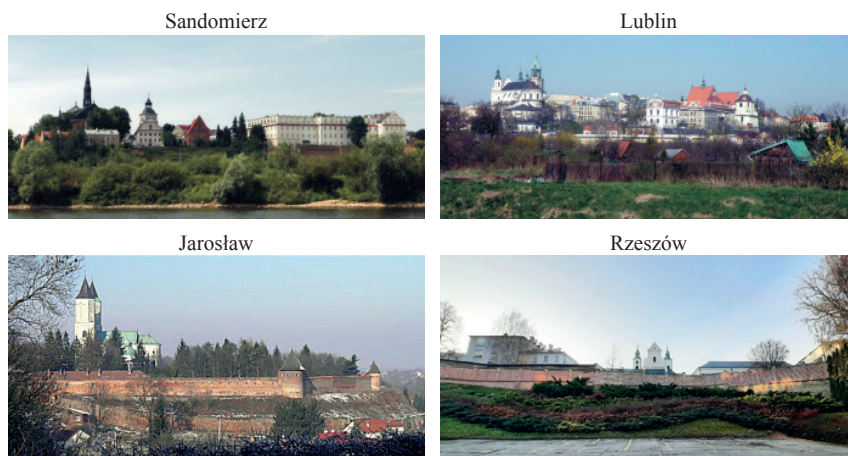
Kluczowym zagadnieniem inżynierskim analizowanym w pracach wielu badaczy jest **zjawisko zapadowości podłoża lessowego**. Zagadnieniem genezy osiadania zapadowego i metodom



Rys. 1. Udział procentowy pokryw lessowych w powierzchni kontynentów
Fig. 1. Percentage of loess covers in the continental area

badania tej właściwości jest poświęcona obszerna literatura [3÷5].

Problemem realizacji inwestycji budowlanych na gruntach zapadowych, takich jak lessy, jest szczególnie istotny z perspektywy inżynierii lądowej w obszarach, gdzie zalegają one w jednorodnych warstwach o dużej miąższości jako dominujący typ podłoża. W warunkach polskich zjawisko to również stanowi zagrożenie w przypadku występowania warstw lessów młodszych o strukturze nietrwałej. Analiza wpływu zmian wilgotności na parametry wytrzymałościowe lessu jest kluczowym zagadnieniem w procesie projektowania geotechnicznego [6]. O wytrzymałości lessu decyduje przede wszystkim sto-



Fot. 1. Zabytkowe miasta polskie położone na wysoczyznach lessowych [2, 6]
Photo 1. Historic Polish cities situated on loess plateaus [2, 6]

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, wandak@prz.edu.pl

pień plastyczności, a w drugiej kolejności porowatość, która może znacznie wpływać na parametry mechaniczne. Niestety porowatość jest bardzo często pomijana w dokumentacji badań podłoża. Podobnie sprawa się ma z badaniem zapadowości.

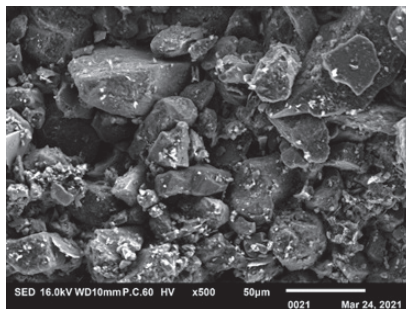
Charakterystyka procesów deformacyjnych w lessach

Do inicjacji procesu zapadania lessu, czyli znacznego zmniejszenia objętości gruntu, dochodzi w wyniku zwiększenia się wilgotności naturalnej i przyłożonego obciążenia. Proces ten obejmuje kolejno następujące etapy: niszczenie pierwotnej mikrostruktury; dezintegracja mikrostruktury; rozwój nowej mikrostruktury po zapadnięciu pierwotnej.

O zapadowości lessu decyduje stopień trwałości struktury i rodzaj wiązań strukturalnych. W lessach występują dwa typy tych wiązań:

- **kontakty fazowe**, trwałe względem wody, polegające na działaniu silnych wiązań chemicznych (siła oddziaływania nie mniejsza niż 10^{-7} N);
- **wiązania koagulacyjne**, nietrwałe względem wody, powstałe w wyniku oddziaływań międzycząsteczkowych i magnetycznych (siła oddziaływania 10^{-10} – 10^{-8} N).

Wraz ze wzrostem wilgotności lessu siła wiązań koagulacyjnych słabnie, co prowadzi często do zerwania kontaktu. Spadek wilgotności odbudowuje siłę wiązania, ale cząsteczki zmieniają konfigurację przestrzenną. Zmiana następuje na poziomie ultraporów ($<0,1 \mu\text{m}$) i dolnej granicy mikroporów ($0,1$ – $10 \mu\text{m}$). Kontakty fazowe cechuje natomiast nieodwracalność w przypadku zniszczenia. Procesy deformacyjne zależą od cech makrostrukturalnych i mikrostrukturalnych lessów. Analiza mikrostruktury pozwala wyjaśnić zmianę parametrów geotechnicznych lessów, natomiast analiza morfometryczna i geometryczna porów (obwód, średnica, pole powierzchni, współczynnik kształtu itp.), w powiązaniu z czynnikami obciążenia i zawilgocenia umożliwia rejestrację ich zmian ilościowych i jakościowych, a w efekcie ocenę zdolności zapadowych. Fotografia 2 przedstawia przykładowy wynik obserwacji próbek lessu z terenu Rzeszowa



Fot. 2. Obraz SEM 500x lessu z głębokości 2,5 m [6]

Photo 2. SEM 500x image of loess from a depth of 2.5 m [6]

za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) [6]. Tego typu badania na próbkach o nienaruszonej strukturze umożliwiły obserwacje cech mikromorfologicznych, takich jak sposób ułożenia ziarn oraz analizę przestrzeni porowej.

Grunty miały strukturę szkieletową, bezładną. W badanym lessie z głębokości 2,5 m występowały różnorodne kombinacje typów wiązań strukturalnych. Stwierdzono obecność ziaren kwarcu oraz wielu agregatów i mikroagregatów. Wymiary większości agregatów nie przekraczały $100 \mu\text{m}$. Zauważono występowanie mieszanego typu połączeń i kontaktów. Wiązania występowały w formie mostków, wytrąceń i otoczek na ziarnach pyłu i drobnego piasku oraz podpór i łańcuszków ilastych.

Obecność trwałych (fazowych) i nietrwałych (koloidalnych) wiązań strukturalnych skutkuje zróżnicowaniem wyników badań wskaźnika zapadowości ($i_{mp} > 0,02$ oraz $i_{mp} \leq 0,02$). Analiza przestrzeni porowej wskazywała na obecność ultraporów, mikroporów i mezoporów. Średnica mezoporów nie przekraczała $50 \mu\text{m}$. Z analizy przestrzeni porowej wynikało, że klasę modalną wśród mezoporów stanowiły pory o średnicy 10 – $20 \mu\text{m}$ zbliżone rozmiarem do mikroporów. Nie zaobserwowano makroporów.

W warstwach bardziej zwietrzałych (poniżej 4 m) występowało więcej połączeń trwałych żelazisto-krzemionkowych. Wiązania przybierały tam najczęściej formę mostków lub powłoki okrywającej ziarna kwarcu. Ze względu na litostratyfację, osiadanie zapadowe lessów zachodzi najintensywniej w lessach młodszych górnych (LMg). Strukturę nietrwałą mają lessy typowe

wysoczyznowe, do głębokości 4 m, a najczęściej do 2 m [7], sklasyfikowane jako grunty mało spoiste (zawartość frakcji pyłowej 70–90%) – głównie pyły lub pyły na granicy gliny pylastej.

Kryteria oceny zapadowości

Ocenę zapadowości wykonuje się metodami bezpośrednimi (obciążenia próbne, badania edometryczne) i pośrednimi. Większość kryteriów oceny ma charakter pośredni i wynika przede wszystkim ze związku zapadowości z cechami fizycznymi, takimi jak skład granulometryczny, wilgotność naturalna i granice konsystencji, gęstość objętościowa i porowatość. W tabeli przedstawiono kryteria oceny właściwości zapadowych lessów proponowane przez różnych autorów.

W identyfikacji cech zapadowości bardzo pomocne są analizy geochemiczne. Znajomość zawartości wapnia i żelaza w profilu badawczym ułatwia właściwą klasyfikację stratygraficzną lessów, pozwala określić jego wapnistość i stopień przeobrażenia pod wpływem czynników środowiskowych. Zwiększona zawartość tlenków żelaza świadczy o wysokim stopniu zwietrzania.

W badanych profilach lessowych z rejonu Rzeszowa wilgotność i gęstość objętościowa zwiększały się wraz z głębokością. Z kolei porowatość n i wskaźnik porowatości e zmniejszały się wraz z głębokością. Potwierdziły to wyniki badań własnych z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej (SEM). Zawartość frakcji ilowej nie przekraczała 15%. W badaniach zastosowano kryterium normowe bazujące na wskaźniku zapadowości i_{mp} . Badania laboratoryjne wykonano w edometrach wg procedury normowej [8] na próbkach typu NNS pobranych z głębokości od 1,5 m do 2,5 m. Próbkę obciążano stopniowo do 200 kPa, a następnie nasycono wodą. Badania wykazały niewielkie osiadania zapadowe ($i_{mp} = 0,00$ – $0,0246$). Można z tego wnioskować, że badane lessy mogą mieć charakter zarówno niezapadowy, jak i zapadowy. Zastosowane kryteria pośrednie wykazały również zagrożenie zapadowością w zależności od naturalnej wilgotności i porowatości. Najprostsze do zastosowania kryterium porowatości wskazało, że grunty

Kryteria oceny zapadowości wg wybranych źródeł

The criteria for assessing the collapsibility according to selected sources

Rodzaj kryterium	Wzór	Skala oceny zapadowości	Źródło
Wskaźnik zapadowości i_{mp}	$i_{mp} = (h' - h'') : h_0$	niezapadowe: $i_{mp} \leq 0,02$ zapadowe: $i_{mp} > 0,02$	[8]
Wskaźnik zapadowości C_p	$C_p = (e_1 - e_2) : (1 + e_0)$	zagrożenie zapadowością: 0–1 brak, 1–5 niewielkie, 5–10 znaczne, 10–20 duże, powyżej 20 b. duże	[9, 10]
Parametr K_e	$K_e = e_{(wL)} : e_0$	zapadowe: $K_e < 0,75$	[11, 12]
Parametr K_d	$K_d = (w_p - w_n) : I_p$	zapadowe: $K_d < 0, (w_p - w_n) < 0$	[12]
Parametr K_L	$K_L = [(w_n/S_r) - w_p] : I_p$	zapadowe: $K_L > 0,85$ i $S_r > 0,6$	[12, 13]
Ciężar objętościowy γ	$\gamma = \rho \cdot g$ [kN/m ³]	zagrożenie zapadowością: $\gamma < 12,6$ znaczne, $12,6 < \gamma < 14,1$ niewielkie	[10, 14]
Porowatość n	$n = e_0 : (1 + e_0)$	niezapadowe: $n < 0,42$, zapadowe: $n > 0,42$	[7]
Presjometryczne	$P_L - P_f$ [MN/m ²]	zapadowe: $P_L - P_f \leq 0,21$	[7]

Oznaczenia: h' – wysokość próbki po zakończeniu osiadania przy danym naprężeniu całkowitym, h'' – wysokość próbki przy tym samym naprężeniu po całkowitym nasyceniu wodą i zakończeniu osiadania, h_0 – wysokość próbki po zakończeniu osiadania przy naprężeniu pierwotnym, e_0 – wskaźnik porowatości naturalnej; e_1 – wskaźnik porowatości po konsolidacji pod obciążeniem 200 kPa; e_2 – wskaźnik porowatości po całkowitym nasyceniu wodą i po konsolidacji pod obciążeniem 200 kPa; $e_{(wL)}$ – wskaźnik porowatości przy wilgotności odpowiadającej granicy płynności; w_p – granica plastyczności; I_p – wskaźnik plastyczności; w_n – wilgotność naturalna; S_r – stopień wilgotności; ρ – gęstość objętościowa; g – przyspieszenie ziemskie; P_L – presjometryczne naprężenie graniczne; P_f – naprężenie pełzania

z głębokości do 2,5 m mogą osiadać zapadowo, ponieważ ich porowatość oscylowała w granicach $n = 0,40 \div 0,54$. Natomiast lessy z głębokości poniżej 8 m charakteryzowały się porowatością poniżej wartości 0,39, co wskazywało na brak zdolności zapadowych. Inne kryteria i cechy (np. rdzawa barwa po wysuszeniu) również świadczyły o braku zapadowości w tych warstwach.

Wnioski

Obiekty zarówno liniowe, jak i kubaturowe realizowane na podłożu lessowym w otoczeniu obiektów zabytkowych powinny być zaliczane do III kategorii geotechnicznej. W programowaniu i zakresie badań należy uwzględnić parametry, które pozwolą na zastosowanie pośrednich kryteriów oceny zapadowości, dających zawsze przybliżone wyniki. Umożliwiają one w szybki sposób (bez żmudnych wielodniowych badań edometrycznych) orientacyjną ocenę właściwości zapadowych. Na szczególną uwagę zasługują kryteria Fedy (1966) i Denisova (1951) oraz ich późniejsze modyfikacje bazujące na charakterystykach gęstości i plastyczności. Bardzo ważne są wyniki lokalnych doświadczeń badawczych i projektowych,

które pozwalają scharakteryzować cechy zapadowe lessów w danym rejonie. Przykładem są empiryczne zależności pomiędzy zapadowością a wilgotnością naturalną, które określili Kolano i Cała [15] w przypadku lessów sandomierskich (**zapadowe $w_n < 4\%$, niezapadowe $w_n > 19\%$, zapadowe i niezapadowe $4\% < w_n < 19\%$**). Wyniki oceny pośredniej powinny determinować decyzję o podjęciu badań metodami bezpośrednimi. Z mojego doświadczenia badawczego wynika, że jeśli zastosowane kryteria pośrednie wykluczają zdolności zapadowe, to nie ma potrzeby wykonywania bezpośrednich badań laboratoryjnych. Natomiast jeśli kryteria pośrednie, a przede wszystkim kryterium porowatości, wskazują na zapadowość lessu, to zalecane jest oznaczenie wskaźnika zapadowości metodą edometryczną.

W podłożu lessowym powstawanie uprzywilejowanych dróg infiltracji pionowej powoduje wydzielenie pionowych bloków, po bokach których sływa woda, tworząc obszary ekstremalnego zawilgocenia. Warto podkreślić, że problem ten pojawia się nie tylko w przypadku lessów o strukturze nietrwałej (zapadowych), ale także gdy lessy charakteryzują się strukturą

trwałą. Zaobserwowane nagłe osiadanie i zapadanie się budynków posadowionych na masywach lessowych (kamienice w Jarosławiu i Sandomierzu) były spowodowane przede wszystkim niewłaściwym odprowadzaniem wód opadowych i awariami instalacji wodno-kanalizacyjnych.

Literatura

[1] Li Y, Shi W, Aydin A, Beroya-Eitner MA, Gao G. 2020. Loess genesis and worldwide distribution. *Earth-Science Rev.*, 102947.
 [2] Solarska A, Hose TA, Vasiljević DjA, Mroczek P, Jary Z, Marković SB, Widawski K. Geodiversity of the loess regions in Poland: Inventory, geoconservation issues, and geotourism potential. *Quaternary International*, 2013; 296:68-81.
 [3] Grabowska-Olszewska B. Skeletal microstructure of loesses – its significance for engineering-geological and geotechnical studies. *Applied Clay Science*, 1989; 4(4):327-336.
 [4] Rogers CD. Hydroconsolidation and subsidence of loess. *Studies from China, Russia, North Americas and Europe. Engineering Geology*, 1994; 37:83–113.
 [5] Xie WL, Li P, Zhang MS, Cheng T, Wang Y. Collapse behaviour and microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China. *J. of Mount. Science*. 2018; 15(8).
 [6] Kokoszka W. Właściwości geotechniczne gruntów lessowych rejonu Rzeszowa. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, 6.04.2022.
 [7] Borowczyk M, Frankowski Z. Zmienność właściwości geotechnicznych lessów w świetle współczesnych metod badań. *Kwartalnik Geologiczny*, 1979; 23(2):447-562.
 [8] PN-88/B-04481:1988. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
 [9] Clemence S, Finbarr AO. Design considerations for collapsible soils. *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.* 1981; 107(GT3):305-317.
 [10] Kozubal JW. Wzmacnianie podłoża w gruntach zapadowych i nienasyconych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2019. Wrocław.
 [11] Denisov NY. The engineering properties of loess and loess-like soils, rap. tech. Gosstroizdat. 1951, Moscow.
 [12] Delage P, Cui Y, Antoine P. Geotechnical problems related with loess deposits in northern France. *Proc. of Int. Conf. on Probl. Soils. East. Mediter. University, Famagusta*. 2006; 517-540.
 [13] Fedá, J. Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice. *Engineering Geology*. 1966; 1(3):201-219.
 [14] Clevenger W.A. Experiences with loess as a foundation material. *Trans. of the Am. Soc. of Civil Engineers*. 1958; 123:151-80.
 [15] Kolano M., Cała M. Lessy okolic Sandomierza w świetle badań geologiczno-inżynierskich. *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2011; 2:349-358.

Przyjęto do druku: 23.09.2022 r.