

Dr. Ing. Marcin Kaczmarzyk¹⁾
ORCID: 0000-0001-5605-5279

Geotechnical properties of lunar regolith

Geotechniczne właściwości księżycowego regolitu

DOI: 10.15199/33.2025.06.15

Abstract. This article is a synthetic review of the current state of knowledge of the basic geotechnical parameters of regolith, i.e. lunar soil. In the era of the intensifying next space race, it was considered potentially useful to summarize key information about the properties of the soil, on which the first extraterrestrial construction structures are likely to be built in the coming years. The paper addressed such issues as the origin and evolution of the regolith, its grain size, bulk density, porosity, degree of compaction, bearing capacity and cohesion.

Keywords: lunar regolith; soil grain size; degree of compaction; lunar buildings.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano syntetyczny przegląd obecnego stanu wiedzy z dziedziny podstawowych parametrów geotechnicznych regolitu, czyli księżycowego gruntu. W dobie intensyfikującego się kolejnego wyścigu kosmicznego, za potencjalnie przydatne uznano podsumowanie kluczowych informacji o właściwościach podłoża gruntowego, na którym w najbliższych latach mają szansę powstać pierwsze pozaziemskie konstrukcje budowlane. Odniesiono się przede wszystkim do zagadnień takich, jak geneza i ewolucja regolitu, jego uziarnienie, gęstość objętościowa, porowatość, stopień zagęszczenia, nośność oraz spójność.

Słowa kluczowe: księżycowy regolit; uziarnienie gruntu; stopień zagęszczenia; budownictwo księżycowe.

The main premise of the ongoing U.S. Artemis space program is to engage commercial entities and U.S. international partners to bring a long-term human presence to the Silver Globe and initiate the sustainable development of lunar infrastructure. The first lunar facility capable of providing long-term human habitation is to be Artemis Base Camp, located at the Moon's south pole [1, 2]. In 2021, the directors of the Chinese and Russian space agencies signed a memorandum on cooperation between the two countries to build an international lunar research station [3]. The next space race of the world's superpowers has a real potential to contribute to the establishment of the first habitable facilities on the lunar surface as early as the end of the third decade of the 21st century. The extremely high cost of space transportation will determine the need to maximize the use of local resources during any construction and building work carried out on the lunar surface. The material available on the Moon in unlimited quantities is the local soil called regolith.

The purpose of this article is to synthesize a review of the current state of knowledge regarding the basic geotechnical properties of lunar soil – a material whose understanding may prove crucial in the coming decades for a new area of civil engineering, namely lunar building engineering.

Origin and evolution of the regolith

In geology, regolith is referred to as a layer of fragmented and unconsolidated rock material that covers the bedrock and forms the land surface. In the case of bodies without an

Głównym założeniem realizowanego obecnie amerykańskiego programu kosmicznego Artemis jest zaangażowanie podmiotów komercyjnych i międzynarodowych partnerów USA w celu doprowadzenia do długoterminowej obecności człowieka na Srebrnym Globie i zapoczątkowanie zrównoważonego rozwoju księżycowej infrastruktury. Pierwszym księżycowym obiektem mogąym zapewnić długoterminowy pobyt ludzi ma być ośrodek Artemis Base Camp, zlokalizowany na południowym biegunie Księżyca [1, 2]. W 2021 r. dyrektorzy chińskiej i rosyjskiej agencji kosmicznej podpisali memorandum dotyczące współpracy obu tych państw przy budowie międzynarodowej księżycowej stacji badawczej [3]. Kolejny wyścig kosmiczny światowych mocarstw ma realną szansę przyczynić się do powstania pierwszych obiektów mieszkalnych na powierzchni Księżyca już pod koniec trzeciej dekady XXI wieku. Ekstremalnie duże koszty transportu kosmicznego będą decydowały o konieczności maksymalizacji wykorzystania miejscowych zasobów podczas wszelkich prac konstrukcyjno-budowlanych prowadzonych na powierzchni Księżyca. Materiałem dostępnym na Księżycu w nieograniczonej ilości jest tamtejszy grunt zwany regolitem.

Celem artykułu jest dokonanie syntetycznego przeglądu obecnego stanu wiedzy dotyczącej podstawowych geotechnicznych właściwości księżycowego gruntu – materiału, którego poznanie może w najbliższych dekadach okazać się kluczowe dla nowego obszaru inżynierii lądowej, czyli budownictwa księżycowego.

Geneza i ewolucja regolitu

W geologii mianem regolitu określa się warstwę rozdrobnionego i nieskonsolidowanego materiału skalnego, który przykrywa skałę macierzystą, tworzy powierzchnię terenu.

¹⁾ Rzeszów University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture; kaczmar@prz.edu.pl

atmosphere, a regolith is defined as a layer of material separating the bedrock from space [4]. At least a several-meter-thick layer of regolith covers almost the entire surface of the Moon. The few exceptions are the steep crater rims and lava tubes [4]. The lunar regolith is formed by the bombardment of the lunar surface by small celestial bodies [5]. By convention, the regolith includes the fraction with grain size < 1 cm. Thus defined, regolith is also called lunar soil [4, 6]. In the regolith, one can distinguish crumbs of parent crystalline rocks, fragments of single minerals, volcanic and impact glass, breccias and unique lunar agglutinates. The latter are petrological formations, taking the form of submillimeter-sized, sharp-edged grains of highly irregular shapes, which may contain open pores. Agglutinates are composed of even finer, partially fused grains, glued together by an impact glass [7, 8]. Agglutinates are formed as a result of bombardment of the existing regolith by cosmic rays and the micrometeoroid flux [4, 9] and mostly constitute 25 – 30% of the volume of the lunar regolith, although variations in their content from as little as 5% to as much as 65% have been reported [4].

Selected properties of regolith

The properties of regolith deposited on the lunar surface depend on its mineralogical composition, grain size, the absence of water and organic compounds and the absence of a lunar atmosphere. Through studies of the lunar surface, it has been established that the aforementioned factors strongly narrow the range of properties of lunar regolith compared to the variety of geotechnical parameters that can characterize terrestrial soils. The mechanical data obtained from the first manned landings on the Moon, most notably the low compressibility and high bearing capacity, in the context of the fine grain size of the soil there, came as somewhat of a surprise to the scientific world. The unexpected properties of regolith are due to the unique environmental conditions under which this material is formed and evolves. Despite the presence of noticeable differences in the chemical and mineralogical composition of the regolith at the landing sites of the various Apollo and Luna program vehicles, the regolith grain size, bulk density, compaction and compressibility data collected by these missions are very similar to each other [10].

Granulometric composition

Based on the Unified Soil Classification System, most samples of lunar regolith qualify as silty sand or sandy silt with a high uniformity coefficient [11]. The average grain size in samples delivered to Earth is $60 - 80 \mu\text{m}$, with a median of $40 - 130 \mu\text{m}$. It is usually around $70 \mu\text{m}$ [12]. A fairly representative example of the granulometric composition of lunar regolith is the material collected during the Apollo 16 mission in core sample No. 60010, shown in Table 1. It shows that more than 80% of the mass of each layer of this sample is made up of grains smaller than 1 mm

W przypadku ciał pozbawionych atmosfery, regolitem określa się warstwę materiału oddzielającego skałę macierzystą od przestrzeni kosmicznej [4]. Co najmniej kilkumetrowej grubości warstwa regolitu pokrywa niemal całą powierzchnię Księżyca. Nieliczne wyjątki stanowią stromo nachylone zbocza kraterów i kanałów lawowych [4]. Księżycowy regolit powstaje wskutek bombardowania powierzchni Księżyca przez małe ciała niebieskie [5]. Umownie do regolitu zaliczana jest frakcja o wymiarze ziaren < 1 cm. Tak zdefiniowany regolit nazywany jest także gruntem księżycowym [4, 6]. W regolicie można wyróżnić okruchy macierzystych skał krystalicznych, fragmenty pojedynczych minerałów, szkliwa wulkaniczne i impaktowe, brekcje oraz unikatowe księżycowe aglutynaty. Te ostatnie to twory petrologiczne, mające postać submilimetrycznych, ostrokrawędzistych ziaren o mocno nieregularnych kształtach, mogące zawierać otwarte pory. Aglutynaty składają się z jeszcze drobniejszych, częściowo stopionych różnorodnych ziaren, sklejonych razem przez szkliwo impaktowe [7, 8]. Aglutynaty powstają wskutek bombardowania istniejącego regolitu przez promieniowanie kosmiczne oraz strumień mikrometeoroidów [4, 9] i stanowią przeważnie 25 – 30% objętości księżycowego regolitu, aczkolwiek zanotowano wahania ich zawartości od zaledwie 5% do nawet 65% [4].

Wybrane właściwości regolitu

Właściwości regolitu zalegającego na powierzchni Księżyca zależą od jego składu mineralogicznego, uziarnienia, braku wody oraz związków organicznych i nieobecności księżycowej atmosfery. Dzięki badaniom powierzchni Księżyca ustalono, że wymienione czynniki mocno zawężają zakres właściwości księżycowego regolitu w porównaniu z różnorodnością parametrów geotechnicznych, jakie mogą cechować grunty ziemskie. Dane mechaniczne uzyskane z pierwszych załogowych lądowań na Księżycu, a przede wszystkim mała ścisłość i duża nośność, w kontekście drobnego uziarnienia tamtejszego gruntu, stanowiły pewne zaskoczenie w świecie naukowym. Nieoczekiwane właściwości regolitu wynikają z unikatowych warunków środowiskowych, w jakich ten materiał powstaje i ewoluuje. Pomimo występowania zauważalnych różnic w składzie chemicznym i mineralogicznym regolitu w miejscach lądowania poszczególnych pojazdów programu Apollo oraz Łuna, zebrane przez te misje dane o uziarnieniu, gęstości objętościowej, zagęszczeniu oraz ścisłości regolitu są do siebie bardzo zbliżone [10].

Skład granulometryczny

Na podstawie zunifikowanego systemu klasyfikacji gruntów (*Unified Soil Classification System*), większość próbek księżycowego regolitu kwalifikuje się jako piasek pylasty lub pył piaszczysty o wysokim wskaźniku różnoziarnistości [11]. Średnia wielkość ziaren w dostarczonych na Ziemię próbkach wynosi $60 - 80 \mu\text{m}$, z medianą $40 - 130 \mu\text{m}$. Zazwyczaj jest to $\sim 70 \mu\text{m}$ [12]. Dość reprezentatywny przykład składu granulometrycznego księżycowego regolitu stanowi materiał zebrany podczas misji Apollo 16 w próbce rdzeniowej nr 60010, przedstawiony w tabeli 1 [10]. Wynika z niej, że ponad 80% masy

Table 1. Regolith grain size distribution in core sample 60010 [10]

Tabela 1. Rozkład uziarnienia regolitu w próbce rdzeniowej 60010 [10]

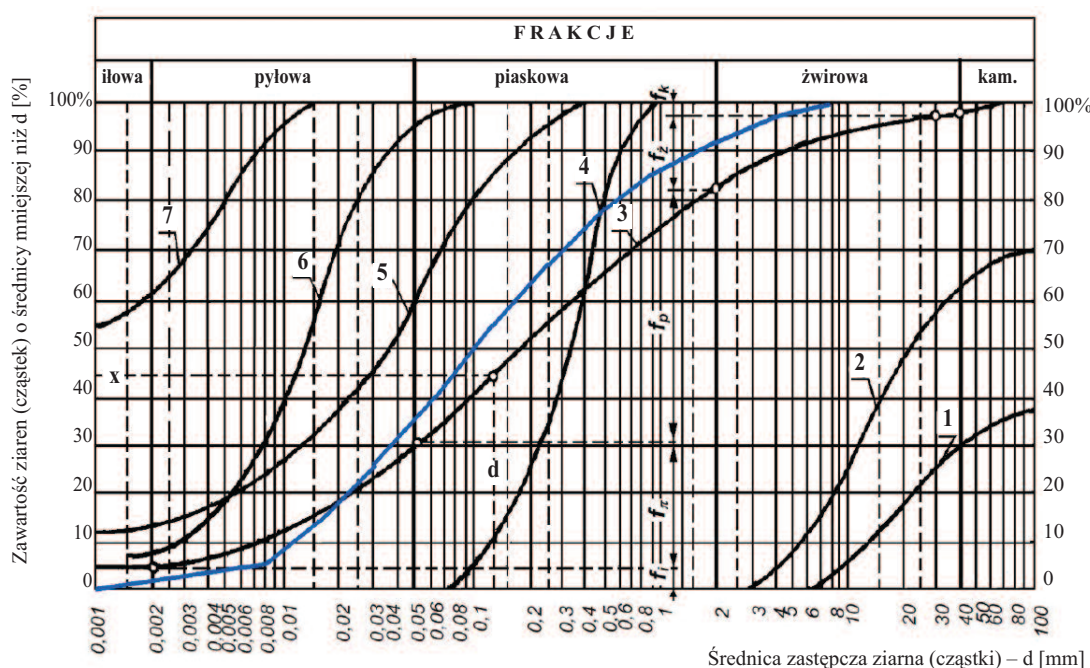
Depth [cm]/ Zagłębienie [cm]	Fraction/Frakcja										
	4 – 8 mm	2 – 4 mm	1 – 2 mm	500 – 1000 µm	250-500 µm	125 – 250 µm	63 – 125 µm	31 – 63 µm	16 – 31 µm	8 – 16 µm	< 8 µm
0 – 1	0%	2%	4%	7%	10%	13,0%	15%	15%	15%	11%	8%
1 – 4	0,0%	2%	4%	8%	10%	12,0%	15%	17%	16%	12%	4%
4 – 12	3,0%	5,0%	6,0%	9,0%	10,0%	12,0%	15,0%	14,5%	11,5%	8,5%	5,5%
12 – 14	4,0%	7,0%	7,0%	10,0%	9,5%	10,5%	11,0%	14,0%	12,5%	9,0%	5,0%
14 – 20	5,0%	8,0%	7,0%	7,5%	8,0%	9,0%	11,0%	14,0%	13,0%	11,0%	6,5%
20 – 24	1,0%	4,0%	7,0%	10,5%	12,0%	12,0%	14,5%	14,0%	11,0%	9,5%	4,5%

in size, and in the near-surface layers the proportion of this fraction exceeds 90%. The content of particles smaller than 16 µm is 10 – 20%. In the lunar regolith, there is a general tendency for the average value of grain size to increase with depth. The granulometric distributions of lunar regolith and typical terrestrial building soils are illustrated in Figure. The grain size curve of regolith lying at a depth of 4 – 12 cm (blue color) was drawn based on the data in Table 1. Terrestrial soils were designated as: stony soil (1), sandy gravel (2), silty sand (3), medium sand (4), clay (5), dust (6) and silt (7) [13].

From the data presented in Figure, it can be seen that, in terms of granulometric composition, the lunar regolith shows some similarity to both common sand and silty sand. At the same time, the high content of the dust fraction (2 – 500 µm) allows to treat regolith as dust. Thus, as can be seen, the classification of regolith in terms of Polish soil science nomenclature poses some difficulties.

każdej warstwy tej próbki stanowią ziarna o wymiarze mniejszym niż 1 mm, a w przypowierzchniowych warstwach udział tej frakcji przekracza 90%. Zawartość cząstek mniejszych niż 16 µm wynosi 10 – 20%. W księżycowym regolicie występuje ogólna tendencja wzrostu średniej wartości wymiaru ziaren wraz z głębokością. Rozkłady granulometryczne księżycowego regolitu oraz typowych ziemskich gruntów budowlanych zilustrowano na rysunku. Krzywą uziarnienia regolitu zalegającego na głębokości 4 – 12 cm (kolor niebieski) sporządzono na podstawie danych zawartych w tabeli 1. Grunty ziemskie oznaczono jako: grunt kamienisty (1), pospółka (2), piasek pylasty (3), piasek średni (4), glina (5), pył (6) oraz ił (7) [13].

Z danych zaprezentowanych na rysunku wynika, że pod względem składu granulometrycznego księżycowy regolit wykazuje pewne podobieństwo zarówno do pospółki, jak i do piasku pylastego. Jednocześnie, duża zawartość frakcji pylastej (2 – 500 µm) pozwala traktować regolit jako pył. Jak zatem widać, klasyfikacja regolitu w kategoriach polskiej nomenklatury gruntoznawczej przysparza pewnych trudności.

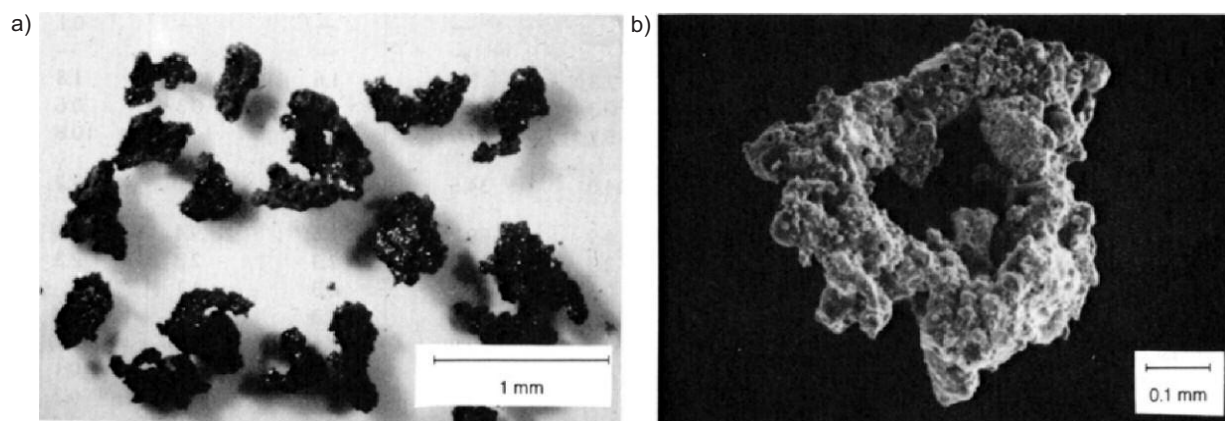


Comparison of grain size curves of subsurface regolith and typical building soils

Porównanie krzywych uziarnienia podpowierzchniowego regolitu oraz typowych gruntów budowlanych

Shape of grains

Grains of lunar regolith are characterized by a wide variety of shapes, there are near-spherical, spherical, elongated, flattened and angular forms. Despite this diversity, most grains of lunar soil are slightly elongated and do not have a compact shape. They are irregular particles with sharp edges, numerous concavities and open pores. The analyses described in [14] show that the specific surface area of grains in a sample of typical lunar soil is eight times larger than that of a set of perfectly spherical grains of identical granulometric composition. The variety of grain shapes of lunar regolith is illustrated in the photograph.



Grains of lunar regolith: a) optical microscope photo of grains separated from soil sample No. 10084, collected during the Apollo 11 mission [Source: NASA Photo S69-54827]; b) scanning electron micrograph of a „donut” – shaped agglutinate from sample No. 10084. The glassy surface of the grain can be seen here, with numerous smaller fragments and several larger bubbles embedded [Source: NASA Photo S87-38812]

Ziarna księżycowego regolitu: a) zdjęcie z mikroskopu optycznego ziaren wyseparowanych z próbki gruntu nr 10084, zebranej podczas misji Apollo 11 [Źródło: NASA Photo S69-54827]; b) skaningowa mikrofotografia elektronowa aglutynatu w kształcie „oponki”, pochodzącego z próbki nr 10084. Widoczna jest tu szklista powierzchnia ziarna z wtopionymi licznymi mniejszymi odłamkami oraz kilkoma większymi pęcherzykami [Źródło: NASA Photo S87-38812]

The shape of the regolith grains shown is due to the rapid course of physical phenomena accompanying impacts of small celestial bodies on the lunar surface. During such impacts, the rock material undergoes crushing, melting, scattering, rapid cooling and secondary fragmentation. The resulting angular grains of complex, irregular shapes are not rounded off by water, glacial or aeolian erosion, but remain intact for millions of years.

Density and porosity

The bulk density and porosity of the lunar regolith have been the subject of numerous in situ studies by unmanned landers and laboratory tests conducted on core samples delivered to Earth as part of the Apollo and Luna programs. Many measurements of geotechnical parameters of the regolith were also made using the unmanned Soviet rovers Lunochod 1 and Lunochod 2 [10, 15]. The results of these geotechnical studies have contributed to the development of numerous functions that approximate the volume density profile of the regolith [10, 16, 17]. Based on the results of various studies of lunar regolith, it has been determined that the first few to several millimeters of the surface layer

Kształt ziaren

Ziarna księżycowego regolitu charakteryzuje duża różnorodność kształtu, występują formy bliskie kulistym, wyoblone, wydłużone, spłaszczone oraz kanciaste. Pomimo tej różnorodności, większość ziaren księżycowego gruntu jest lekko wydłużona i nie ma zwartego kształtu. Są to cząstki nieregularne, o ostrych krawędziach, licznych wklęsłościach i otwartych porach. Z analiz opisanych w [14] wynika, że powierzchnia właściwa ziaren w próbce typowego gruntu księżycowego jest ośmiokrotnie większa niż w przypadku zbioru idealnie sferycznych ziaren o identycznym składzie granulometrycznym. Różnorodność kształtów ziaren księżycowego regolitu ilustruje fotografia.

Przedstawiony kształt ziaren regolitu wynika z gwałtownego przebiegu zjawisk fizycznych towarzyszących uderzeniom małych ciał niebieskich w powierzchnię Księżyca. Podczas takich zderzeń materiał skalny podlega kruszeniu, topieniu, rozrucaniu, szybkiemu stygnięciu i wtórnemu rozdrobnieniu. Powstałe w ten sposób kanciaste ziarna o złożonych, nieregularnych kształtach nie są zaokrąglane przez erozję wodną, glacialną ani eoliczną, lecz pozostają nienaruszone przez miliony lat.

Gęstość i porowatość

Gęstość objętościowa i porowatość księżycowego regolitu stanowiły przedmiot licznych badań in situ dokonywanych przez bezzałogowe lądowniki oraz badań laboratoryjnych prowadzonych na próbkach rdzeniowych dostarczonych na Ziemię w ramach programu Apollo oraz Łuna. Wiele pomiarów parametrów geotechnicznych regolitu dokonano również z wykorzystaniem bezzałogowych radzieckich łazików Łunochod 1 i Łunochod 2 [10, 15]. Wyniki tych badań geotechnicznych przyczyniły się do powstania licznych funkcji aproksymujących profil gęstości objętościowej regolitu [10, 16, 17]. Na podstawie wyników różnych badań księżycowego regolitu ustalono, że pierwsze kilka, kilkanaście milimetrów warstwy po-

are very fine, loosely piled particles, and the bulk density of this layer is 1100 – 1300 kg/m³. The volumetric density of the regolith initially shows a very rapid increase with depth, exceeding the average value of 1500 kg/m³ for the first 15 cm, and then stabilizes at a depth of about 50 cm at a value of about 1800 – 1920 kg/m³, and continues to increase very slowly to a depth of about 3 m, as this is the value reached by the deepest wells drilled on the Moon [4]. Currently, little is known about the geotechnical properties of the deeper regolith [10].

Porosity. Knowledge of volumetric density makes it possible to infer the porosity of non-cohesive soils. Since the mineralogical composition of regolith does not change with depth, an increase in bulk density as a function of depression indicates a decrease in porosity with depth. The regolith porosity data presented in [18] are considered the most authoritative and representative. The authors showed that with an accuracy of 2%, the average relative porosity of the first 15 cm below the ground surface is 52%, decreases to 49% for the first 30 cm, and the value averaged at a depth of 0 – 60 cm is 46%.

Specific density. The average specific density of the grains of the test soil can be determined by knowing the dry weight of the sample and the volume of its soil skeleton. Based on the analysis of the results of many studies of lunar regolith [10], it is recommended to take the average specific density of regolith of 3.1 g/cm³. This value is contributed by various types of rock fragments with a specific density of 1.0 – 3.32 g/cm³ [19].

Degree of compaction

Even initial qualitative attempts to estimate the degree of compaction of lunar regolith have shown that underneath a thin, approximately five-centimeter layer of loose material, the ground quickly reaches considerable compaction. Numerous in situ tests performed with conical penetrometers as part of the Apollo and Lunochod programs have shown that the degree of compaction of lunar regolith is 63 – 95%, with an average value of 83 – 84%. The depth dependence of the average degree of compaction of regolith layers for the plains between craters is shown in Table 2 [20].

The medium-compacted soil at the surface transitions very quickly to a compacted state and then to a highly compacted state, reaching a compaction degree of ID = 0.9 already at a depth of 30 cm [10]. The presented ID values were compared with the Polish regulations for the compaction and stabilization of soils for road and railroad structure foundations and embankments. The values of IS compaction indices determined by the relevant standards [21, 22] were converted to ID compaction rates using the recommended correlation formula [23]. The comparison showed that lunar regolith in intercrater areas is naturally compacted to a

wierzchniowej stanowią bardzo drobne, luźno usypane cząstki, a gęstość objętościowa tej warstwy wynosi 1100 – 1300 kg/m³. Gęstość objętościowa regolitu wykazuje początkowo bardzo szybki wzrost wraz z głębokością, przekraczając średnią wartość 1500 kg/m³ w przypadku pierwszych 15 cm, a następnie stabilizuje się na głębokości ok 50 cm przy wartości ~1800 – 1920 kg/m³ i dalej zwiększa się już bardzo wolno [4]. do głębokości ok. 3 m, gdyż jest to wartość, do której sięgnęły najgłębsze odwierty wykonane na Księżycu. Obecnie niewiele wiadomo o właściwościach geotechnicznych głębiej położonego regolitu [10].

Porowatość. Znajomość gęstości objętościowej pozwala wnioskować o porowatości gruntów niespoistych. W związku z tym, że skład mineralogiczny regolitu nie zmienia się wraz z głębokością, zwiększenie gęstości objętościowej w funkcji zagłębienia świadczy o spadku porowatości wraz z głębokością. Za najbardziej miarodajne i reprezentatywne uznaje się dane o porowatości regolitu przedstawione w [18]. Autorzy tej publikacji wykazali, że z dokładnością do 2% średnia porowatość względna pierwszych 15 cm pod powierzchnią terenu wynosi 52%, zmniejsza się do 49% w przypadku pierwszych 30 cm, a wartość uśredniona na głębokości 0 – 60 cm wynosi 46%.

Gęstość właściwa. Średnią gęstość właściwą ziaren badanego gruntu można wyznaczyć, znając masę suchej próbki i objętość jej szkieletu gruntowego. Na podstawie analizy wyników wielu badań księżycowego regolitu [10] zaleca się przyjmowanie średniej gęstości właściwej regolitu 3,1 g/cm³. Wartość tę współtworzą różnego typu fragmenty skalne o gęstości właściwej 1,0 – 3,32 g/cm³ [19].

Stopień zagęszczenia

Już wstępne jakościowe próby oszacowania stopnia zagęszczenia księżycowego regolitu wykazały, że pod cienką, ok. pięciocentymetrową warstwą luźnego materiału, grunt szybko osiąga znaczne zagęszczenie. Liczne badania in situ wykonywane stożkowymi penetrometrami w ramach programów Apollo i Lunochod wykazały, że stopień zagęszczenia regolitu księżycowego wynosi 63 – 95%, ze średnią wartością 83 – 84%. Zależność średniego stopnia zagęszczenia warstw regolitu od głębokości w przypadku równinnych obszarów położonych między kraterami przedstawiono w tabeli 2 [20].

Zalegający na powierzchni średnio zagęszczony grunt przechodzi bardzo szybko w stan zagęszczony, a następnie w bardzo zagęszczony, osiągając stopień zagęszczenia ID = 0,9 już na głębokości 30 cm [10]. Przedstawione wartości ID porównano z polskimi przepisami dotyczącymi zagęszczania i stabilizacji gruntów do podbudów i nasypów konstrukcji drogowych i kolejowych. Określone przez odpowiednie normy [21, 22] wartości wskaźników zagęszczenia IS przeliczono na stopień zagęszczenia ID z wykorzystaniem zalecanego wzoru korelacyjnego [23]. Porównanie wykazało, że księżycowy regolit na obszarach międzykraterowych jest naturalnie zagęszczony w stopniu porównywalnym z mechanicznie zagęszczonymi ziemski-

Table 2. Regolith degree of compaction for flat intercrater terrains

Tabela 2. Wartość stopnia zagęszczenia regolitu w przypadku równinnych terenów międzykraterowych

Depth [cm/ Zagłębienie [cm]	Degree of compaction [-/ Stopień zagęszczenia [-]
0 – 15	62 – 67%
0 – 30	70 – 78%
0 – 60	80 – 85%
30 – 60	90 – 95%

degree comparable to mechanically compacted non-cohesive earth soils. Regardless of the type of terrain, in every case analyzed, the lunar regolith exhibited significantly higher compaction than it would have developed naturally under its own weight. The impact genesis of the regolith is believed to be the reason for this. Seismic waves caused by impacts have been shaking the Moon's lithosphere for billions of years and successively compacting the material covering its surface [5].

Other geotechnical parameters

During the Apollo 16 mission, astronaut Charles Duke observed that a vertical well with a diameter of 4.5 cm did not collapse when the drill rig was removed, but remained stable to a depth of more than 2 m. A similar observation was made during the Apollo 17 mission, except that at that time the walls of the borehole, reaching 3 m, remained stable. It was calculated that the angle of internal friction of the lunar regolith was about 45° at those locations, and the cohesion was 1.1 – 1.8 kPa [10]. Despite its zero moisture content, lunar regolith exhibits quite high cohesion, which is a result of the shape of its grains, the significant content of particles with a dimension of less than 200 μm , and the strong electrostatic interactions occurring between these particles [24]. On the basis of geotechnical studies conducted on the Moon's surface, it is believed that vertical excavation in the regolith can be safely carried out to a depth of about 3 m, and the formation of slopes with an inclination of 60° will make it possible to realize excavation to a depth of 10 m. Analyses, the results of which are summarized in [10], show that the bearing capacity of the lunar regolith in the vast majority of areas explored was about 6000 kPa.

Summary and conclusions

Virtually the entire surface of the Moon is covered by a layer of fine-grained, loose rock material called regolith. Its surprising geotechnical properties are due to the peculiarities of the environment there, far different from that of Earth. In the flat intercrater areas, lunar regolith is characterized by geotechnical parameters at least as good as mechanically compacted terrestrial non-cohesive soils. Taking additionally into account the relatively low gravity prevailing on the surface of our natural satellite, it was concluded that the lunar plains have excellent ground conditions for the foundation of various building structures. Based on the available data, it can be concluded that in the foreseeable future, the location of building structures on the lunar surface and the landing of space vehicles there should not pose any problems in terms of ground bearing capacity.

The lunar regolith, however, exhibits strong abrasive properties; it leads to rapid wear of spacesuit components and bare mechanism parts. Grains with sizes smaller than 20 μm are considered particularly problematic [25]. These particles strongly adhere to the surface of spacesuits and equipment due to electrostatic interactions. Contamination of the interior of

mi gruntami niespoistymi. Bez względu na rodzaj terenu, w każdym analizowanym przypadku księżycowy regolit wykazywał znacznie większe zagęszczenie niż to, jakie mogłoby powstać naturalnie pod jego własnym ciężarem. Za przyczynę takiego stanu rzeczy uważa się impaktową genezę regolitu. Fale sejsmiczne wywoływane impaktami wstrząsają litosferą Księżyca od miliardów lat i sukcesywnie zagęszczają materiał pokrywający jego powierzchnię [5].

Inne parametry geotechniczne

Podczas misji Apollo 16 astronauta Charles Duke zauważył, że pionowy odwiert o średnicy 4,5 cm nie zapadł się po wyjęciu wiertnicy, lecz pozostał stabilny do głębokości ponad 2 m. Podobnej obserwacji dokonano podczas misji Apollo 17, z tym że wówczas stabilne pozostały ściany odwiertu sięgającego 3 m. Obliczono, że kąt tarcia wewnętrznego księżycowego regolitu wynosił w tamtych miejscach ok. 45° , a spójność 1,1 – 1,8 kPa [10]. Pomimo zerowej wilgotności, księżycowy regolit wykazuje dosyć dużą spójność, co jest efektem kształtu jego ziaren, znacznej zawartości cząstek o wymiarze mniejszym niż 200 μm oraz silnych oddziaływań elektrostatycznych występujących między tymi cząstkami [24]. Na podstawie badań geotechnicznych, prowadzonych na powierzchni Księżyca, uważa się, że można bezpiecznie wykonywać pionowe wykopy w regolicie do głębokości ok. 3 m, a formowanie skarp o nachyleniu 60° umożliwi zrealizowanie wykopu do głębokości 10 m. Analizy, których wyniki zestawiono w [10], wykazują, że nośność księżycowego regolitu na znacznej większości eksplorowanych obszarów wynosiła ok. 6000 kPa.

Podsumowanie i wnioski

Praktycznie całą powierzchnię Księżyca pokrywa warstwa drobnoziarnistego, sypkiego materiału skalnego, zwana regolitem. Zaskakujące jego właściwości geotechniczne wynikają ze specyfiki tamtego środowiska, dalece odmiennego od środowiska ziemskiego. Na równinnych obszarach międzykraterowych, księżycowy regolit odznacza się parametrami geotechnicznymi co najmniej tak dobrymi jak mechanicznie zagęszczone ziemskie grunty niespoiste. Biorąc dodatkowo pod uwagę względnie małe ciśnienie panujące na powierzchni naszego naturalnego satelity, stwierdzono, że na księżycowych równinach występują doskonałe warunki gruntowe do posadawiania różnych konstrukcji budowlanych. Na podstawie dostępnych danych można wnioskować, że w dającej się przewidzieć przyszłości, lokalizowanie obiektów budowlanych na powierzchni Księżyca oraz lądowanie tam pojazdów kosmicznych nie powinno stanowić jakichkolwiek problemów pod względem nośności podłoża.

Księżycowy regolit wykazuje jednak silne właściwości abrazyjne; doprowadza do szybkiego zużywania się elementów skafandrów kosmicznych i nieosłoniętych części mechanizmów. Za szczególnie problematyczne uznaje się ziarna o rozmiarach mniejszych niż 20 μm . Cząstki te silnie przylegają do powierzchni skafandrów i sprzętu wskutek od-

the lunar base with these particles appears to be extremely difficult to avoid, and inhalation of such fine particles poses a health risk to astronauts [26].

działań elektrostatycznych [25]. Kontaminacja wnętrza księżycowej bazy tymi cząstkami wydaje się być niezwykle trudna do uniknięcia, a inhalacja tak drobnych cząstek stanowi zagrożenie dla zdrowia astronautów [26].

Received: 07.01.2025 r.
Revised: 16.02.2025 r.
Published: 24.06.2025 r.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.01.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 16.02.2025 r.
Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literature

- [1] Artemis PLAN- NASA's Lunar Exploration Program Overview September 2020 https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/Artemis_plan-20200921.pdf.
- [2] Artemis Deep Space Habitation: Enabling a Sustained Human Presence on the Moon and Beyond; [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220000245/downloads/Artemis%20Deep%20Space%20Habitation%20Enabling%20a%20Sustained%20Human%20Presence%20on%20the%20Moon%20and%20Beyond%20\(3\).pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220000245/downloads/Artemis%20Deep%20Space%20Habitation%20Enabling%20a%20Sustained%20Human%20Presence%20on%20the%20Moon%20and%20Beyond%20(3).pdf).
- [3] Chiny i Rosja podpisały memorandum w sprawie bazy na Księżycu – kosmonauta. net <https://kosmonauta.net/2021/03/chiny-i-rosja-podpisyly-memorandum-w-sprawie-bazy-na-ksiezycu/>.
- [4] McKay DS, A. i in. The Lunar Regolith, w Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon, http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter07.pdf.
- [5] Kaczmarzyk M. Zjawiska impaktowe jako nadrzędny proces kształtujący powierzchnię Księżyca. Acta Soc Metheorit Pol. 2024; 15: 56–70.
- [6] Alshibli K. Lunar Regolith. <https://alshibli.utk.edu/research/LR/Lr.php>.
- [7] Wang S, Wu Y, Blewett D. et al. Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang'E-3 mission. Geophys. Res. Lett. 2017; vol. 44, no. 8, ss. 3485 – 3492.
- [8] Taylor GJ, I in. Lunar rocks, w Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon, http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter06.pdf.
- [9] Lucey P, I in. Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions. Rev. Mineral. Geochem. 2006; vol. 60, no. 1, ss. 83–219.
- [10] Carrier D, Olhoeft GR, Mendell W. Physical properties of the lunar surface, w Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon; http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter09.pdf.
- [11] Lambe TW, Whitman RV. Soil Mechanics. The Moon. 1969; vol. 7, ss. 131–148.
- [12] Carrier WD. Lunar soil grain size distribution. The Moon. 1973; vol. 6, ss. 250–263.
- [13] PN-86/B-02480 Grunty budowlane – określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [14] Cadenhead D, I in. Some surface area and porosity characterizations of lunar soils. Proc. 8th Lunar Sci. Conf., Houston, TX, Mar. 1977, ss. 1291–1303.
- [15] Lunokhod programme, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_programme.
- [16] Keihm SJ, Langseth MG. Lunar microwave brightness temperature observations reevaluated in the light of Apollo program findings. Icarus. 1975; vol. 24, ss. 211–230.
- [17] Vasavada AR, I in. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. J. Geophys. Res. 2012; vol. 117.
- [18] Mitchell JK i in. Soil mechanics, in Apollo 16 Preliminary Science Report, NASA SP-315, ss. 8–29, 1972.
- [19] Duke MB i in. Genesis of lunar soil at Tranquillity Base. Geochim. Cosmochim. Acta Suppl., vol. 1, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., ss. 347 – 361, 1970.
- [20] Mitchell JK i in. Apollo Soil Mechanics Experiment S-200. Final report. NASA Contract NAS 9–11266, Space Sciences Laboratory Series, no. 15, 1974.
- [21] PN-S-02205: 1998, Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania.
- [22] BN-88/8932-02, Podtorze i podłoże kolejowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania.
- [23] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych Cz. 1, Cz. 2. ftp://zdw.home.pl/wzp3/271-2_15/Instrukcja_badan_podloza/INSTRUKCJA%20BADAN%20%20PODLOZA%20GRUNTOWEGO%20CZ.1.pdf.
- [24] Carrier WD, Mitchell JK, Mahmood A. The nature of lunar soil. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE. 1973; vol. 99, ss. 813–832.
- [25] Abbas M. i in. Lunar dust charging by photoelectric emissions. Planet. Space Sci. 55, 7-8, 2007, ss. 953-965.
- [26] han-Mayberry N. The lunar environment: Determining the health effects of exposure to moon dusts. Acta Astronaut. 2008, 63, 7–10, ss. 1006-1014.