

УДК 620.171 : 620.179

**КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СВЯЗЬ ТВЕРДОСТИ ТРАВЕРТИНА ПО ЛИБУ
С ЕГО ПРОЧНОСТЬЮ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ**

Э. Оздемир^{1,2}, О. Долмаз¹

¹Университет Инону, E-mail: ozdemir.engin@inonu.edu.tr, 44280, г. Малатья, Турция

²Профессиональное училище при Университете Инону, 44280, г. Малатья, Турция

Определены плотность, пористость, скорость P -волны и твердость по Либу на примере образцов из различных карьеров Турции. Выполнена оценка их корреляции с прочностью на одноосное сжатие. Между физико-механическими свойствами и прочностью на одноосное сжатие установлена экспоненциальная зависимость. Наибольшая корреляция выявлена между прочностью на одноосное сжатие и твердостью по Либу, коэффициент корреляции составил 0.91.

Горная порода, травертин, прочность на одноосное сжатие, твердость по Либу

DOI: 10.15372/FTPRPI20240608

EDN: QBUGZI

Прочность горных пород на сжатие (UCS) — фундаментальное свойство при решении разнообразных инженерных и геологических задач. Данная величина является основным параметром, характеризующим механическое поведение горных пород [1, 2]. Она обеспечивает количественную оценку сопротивляемости породы сжатию и позволяет делать выводы об ее устойчивости и структурной целостности.

В горнодобывающей промышленности, гражданском и горнотехническом строительстве прочность пород на одноосное сжатие — ключевой параметр для проектирования фундаментов, тоннелей, дамб, отвалов и других сооружений [3, 4]. Количественная оценка прочности позволяет принимать инженерные решения, связанные с устойчивостью горнотехнических объектов, технологией добычи и общей безопасностью на объектах недропользования. Корректная оценка величины UCS обеспечивает понимание правильности проектирования и эксплуатации объектов с точки зрения исключения обрушения и других угроз [5, 6]. Косвенная оценка UCS обычно осуществляется, когда прямое измерение невозможно или необходима быстрая оценка без привлечения лабораторных испытаний.

Разработано несколько методов оценки UCS на основе других свойств породы, которые достаточно легко измерить. Косвенная оценка UCS — значимый инструмент предварительного принятия решений. Важно помнить, что точность косвенных методов может весьма широко изменяться в зависимости от типа породы, минералогического состава и применяемых корре-

лирующих соотношений [7, 8]. Обычно UCS оценивают косвенным образом по отскоку молотка Шмидта, индексу точечной нагрузки, бразильской прочности на растяжение и по скорости распространения акустической волны. Косвенные методы применяются в тех ситуациях, когда получение образца исследуемой породы затруднено или невозможно в принципе, однако они предлагают лишь приблизительные результаты для предварительной оценки.

За последние годы разработаны эмпирические модели прогнозирования UCS по отскоку молотка Шмидта [9]. Их цель — получение решения для быстрой оценки прочности в полевых условиях в тех случаях, когда лабораторные испытания крайне затруднены. В [10] выявлены соотношения между механическими и физическими свойствами туфа, используемого в качестве строительного камня. Между свойствами установлены корреляции, позволяющие выполнять надежную оценку простыми и низкочастотными методами.

В [11] показано, что твердость по Либу (HL) может применяться в дополнение к отскоку молотка Шмидта. Она разработана для оценки прочности металлов. Теоретическая основа твердости по Либу аналогична молотку Шмидта или склероскопу Шора и базируется на динамическом воздействии на материал. Твердость по Либу рассматривается как альтернатива методу Шмидта и в горных науках.

В [12] выполнена оценка UCS с помощью искусственной нейронной сети на основе твердости по Либу, пористости, плотности, размера зерна и литологического состава породы. В [13] получена корреляция между UCS и HL на примере магматических (гранит, габбро, андезит, туф) и осадочных (песчаник, известняк) пород. В [14] проведены статистические и экспериментальные исследования выветривания породы с помощью твердости по Либу и отскока молотка Шмидта. Использование двух методов позволило повысить точность исследования. Согласно [15], HL — самый удобный метод оценки UCS на примере образцов сланца. В [16] установлено соотношение между UCS и HL для образцов песчаника на основе экспериментальных и статистических исследований. В [17] разработаны значимые модели корреляции между UCS и HL на основе данных из предыдущих работ. В [18] достигнута значимая корреляция между UCS и HL, которая позволила определить хрупкость рассматриваемых пород. В [19] совместное применение молотка Шмидта и твердости по Либу позволило повысить точность оценки прочности породы на сжатие. В [20] выявлено экспоненциальное соотношение между UCS и HL на примере разных горных пород. В [21] выявлена сильная связь между HL и модулем Юнга базальтовой породы. В [22] проанализированы простая и множественная регрессии для оценки UCS неразрушающими методами (HL, скорость P -волны). В [23] изучено влияние размера образца на твердость по Либу на примере 15 магматических пород. В [24] определена хрупкость карбонатных пород по трем видам твердости (по Шмидту, Шору, Либу).

В предыдущих исследованиях рассматривались осадочные, магматические и метаморфические породы. Однако требуется разработать более значимые модели для похожих типов пород. В настоящей работе рассмотрены образцы травертина, собранные в различных месторождениях Турции, и определены их прочности на одноосное сжатие неразрушающими методами, что особенно важно при анализе состояния исторических зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Взято 13 образцов травертина из месторождений природного камня в следующих районах Турции: Кайсери; Сивас; Конья; Малатья; Элязыг; Ширнак; Битлис; Эрзурум. Для испытаний им придали кубическую форму с размером стороны 7 см согласно стандарту EN 1926 и [23]. С каждого месторождения подготовлено по три образца. На рис. 1 показано оборудование для экспериментальных исследований травертина.

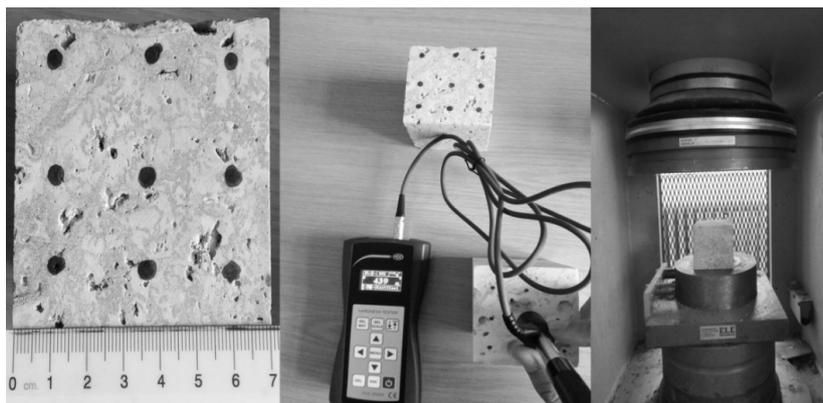


Рис. 1. Оборудование для экспериментальных исследований

Для расчета плотности и пористости горных пород необходимо определить вес образцов в сухом и влагонасыщенном состоянии, а также при условии полного погружения образца в воду. Сначала образец помещался в печь при $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 24 ч для полного удаления влаги и получения постоянного веса, затем в сушильный шкаф (десикатор) и охлаждения до комнатной температуры, после чего на точных весах измерялся вес в сухом состоянии W_d . Для определения веса во влагонасыщенном состоянии W_{sat} образец погружался в воду на 48 ч. Вес образца измерялся после достижения постоянного значения. Далее образец полностью погружался в воду и с помощью весов Архимеда измерялся его вес в погруженном состоянии W_{sub} . Важно обеспечить полное погружение образца в воду во время измерения для точного определения выталкивающей силы, воздействующей на образец соответствующего объема. Объем образца породы рассчитывался по формуле $V = W_{sat} - W_{sub}$, плотность — $\rho = W_d / V$, пористость — $\eta = [(W_{sat} - W_d) / V] \cdot 100$ [26].

Измерение твердости по Либу — достаточно дешевый, простой, портативный и неразрушающий метод, которые изначально использовался для оценки качества металлов. В настоящей работе применялся твердомер PSE-2000N (тип D), в основе которого лежит принцип отскока. Данный метод измерения твердости динамический и заключается в ударе образца твердым металлическим шариком с predetermined энергией удара. Удар твердым металлическим шариком о поверхность образца приводит к пластической деформации в точке удара. Эта деформация сопровождается потерей энергии, пропорциональной твердости образца, и определяется отношением скорости отскока к скорости удара. Испытание выполнялось в девяти точках на одной грани образца и включало по три измерения в точке; затем рассчитывалась средняя твердость (рис. 2).

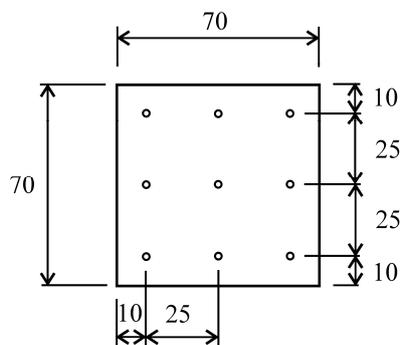


Рис. 2. Расположение точек измерения твердости по Либу на поверхности кубического образца

Скорость распространения ультразвуковых волн в породе определялась по стандарту ISRM 1978 [25]. Для этого на торцах цилиндрического образца устанавливались два трансдюсера (передатчик и приемник), которые соединялись с усилителем регистрирующей аппаратуры. Для улучшения контакта между поверхностью образца и передатчиком/приемником использовался специальный гель. Скорость P -волны измерялась на образце без какого-либо зазора между образцом и трансдюсерами и рассчитывалась по формулам:

$$V_p = \frac{L}{T_p}, \quad T_p = t_p - t_0,$$

где L — длина цилиндрического образца (расстояние прохождения акустического сигнала), мм; T_p — продолжительность прохождения волны, мс; t_0 — время начала прохождения волны, мс; t_p — время прихода волны на приемник, мс.

Для определения прочности породы на сжатие в данной работе брались кубические образцы, скорость нагружения устанавливалась на значениях, рекомендованном стандартом ISRM 1979 [28]. Прочность на одноосное сжатие вычислялась как $\sigma_c = F / A$ (F — максимальная прикладываемая нагрузка, A — площадь поперечного сечения образца). Затем использовалось эмпирическое соотношение для преобразования прочности на одноосное сжатие цилиндрического образца в прочность кубического образца [29]: $\sigma_{cube} = k \sigma_{cyl}$. Здесь σ_{cube} , σ_{cyl} — прочность кубического и цилиндрического образца на одноосное сжатие; $k = 1.05 - 1.2$ — поправочный коэффициент, выбираемый в зависимости от типа породы, размера образца и стандартов измерения (в работе принят $k = 1.2$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-механические свойства травертина определялись согласно стандартам, рекомендованным TSE и ISRM [23–26]. Полученные значения представлены в таблице. Методы неразрушающего контроля имеют относительно низкую стоимость и просты в исполнении, поэтому широко применяются для оценки UCS. В настоящей работе рассмотрены соотношения между UCS и V_p , ρ , η и HL травертина (рис. 3). Для каждого соотношения получены аппроксимации и экспоненциально-аналитические выражения, отражающие корреляцию между величинами.

Физико-механические свойства образцов травертина из разных месторождений

Образец	HL	V_p , м/с	ρ , г/см ³	η , %	UCS, МПа
T1	506	4390	2.50	6.40	27.9
T2	442	3410	2.36	19.04	22.4
T3	545	4860	2.40	3.98	32.8
T4	539	4533	2.49	5.98	30.4
T5	495	4012	2.47	6.41	24.8
T6	540	4570	2.48	6.38	33.2
T7	552	4440	2.51	6.52	34.6
T8	564	4850	2.54	6.08	35.7
T9	456	4010	2.20	8.84	25.7
T10	502	4165	2.35	6.17	26.4
T11	559	4412	2.51	6.28	34.4
T12	476	3417	2.32	18.03	22.9
T13	452	3301	2.33	13.28	20.8

На рис. 3а приведено экспоненциальное соотношение между плотностью и UCS ($R^2=0.48$). Несмотря на слабую корреляцию, установлено, что при увеличении плотности UCS также увеличивается. Подобная слабая корреляция выявлена между UCS и пористостью ($R^2=0.55$) (рис. 3б). При увеличении пористости UCS уменьшается.

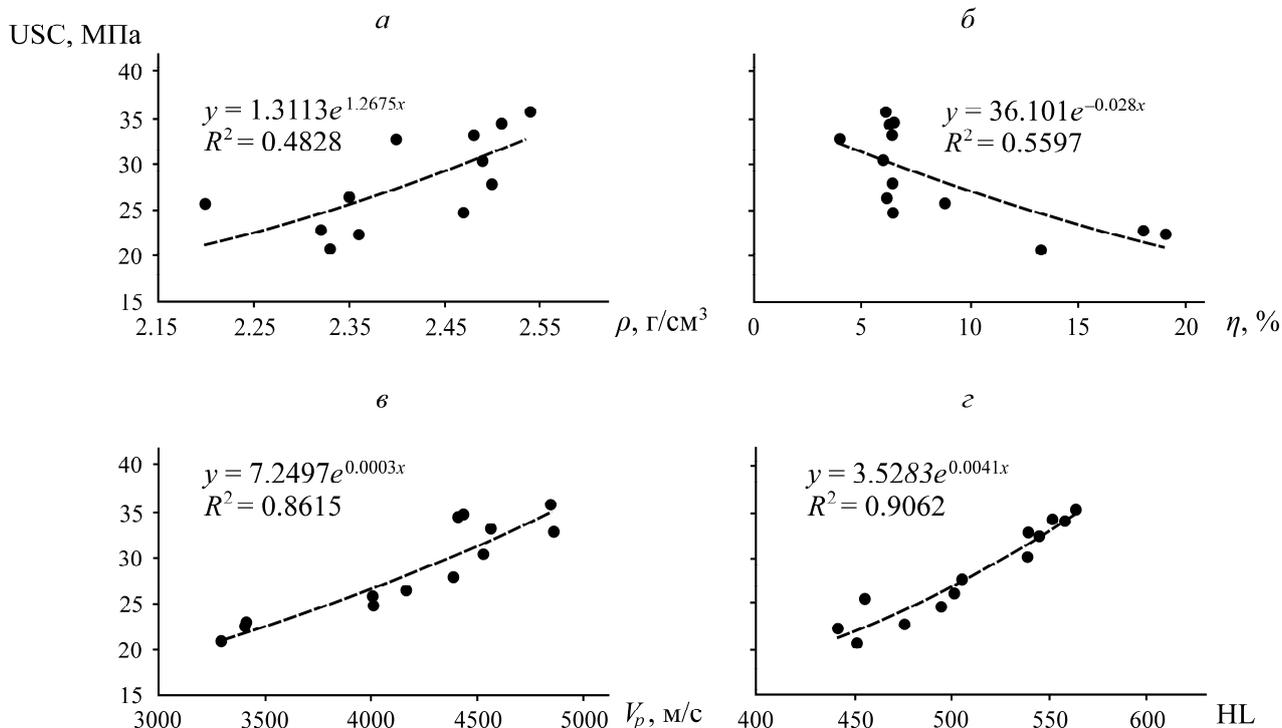


Рис. 3. Соотношения между UCS и плотностью травертина (а), между UCS и пористостью (б), UCS и скоростью P-волны (в), между UCS и твердостью травертина по Либу (г)

Соотношения между UCS и HL и V_p имеют более сильную корреляцию по сравнению с плотностью и пористостью. На рис. 3в показано экспоненциальное соотношение между UCS и V_p ($R^2=0.86$). На основании столь сильной корреляции полученное соотношение между UCS и V_p можно считать статистически значимым. Наибольший коэффициент корреляции найден для соотношения между UCS и HL, который составил 0.91 (рис. 3г). Определяя твердость травертина по Либу, данное аппроксимирующее уравнение можно использовать для оценки его прочности на одноосное сжатие

ВЫВОДЫ

Рассмотрена косвенная оценка прочности травертина на одноосное сжатие, которая широко используется при анализе состояния исторических зданий, если сбор образцов для лабораторных исследований невозможен. Для этих целей исследовано применение показателя твердости по Либу. Определены плотности, пористости, скорости распространения P-волн и твердости по Либу кубических образцов травертина из 13 месторождений Турции и их соотношения с прочностью на одноосное сжатие. Для плотности и пористости коэффициенты корреляции составили 0.48 и 0.55, для скорости P-волны и твердости по Либу — 0.86 и 0.91. Используя полученное аналитическое выражение для соотношения между UCS и HL, можно оценивать прочности пород, аналогичных травертину, на основе твердости по Либу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cargill J. S. and Shakoor A.** Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1990, Vol. 27. — P. 495–503.
2. **Özdemir E. and Eren Sarıci D.** Combined effect of loading rate and water content on mechanical behavior of natural stones, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 6. — P. 931–937.
3. **Mishra D. A. and Basu A.** Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system, *Eng. Geol.*, 2013, Vol. 160. — P. 54–68.
4. **Özdemir E.** A new predictive model for uniaxial compressive strength of rock using machine learning method: Artificial intelligence-based age-layered population structure genetic programming (ALPS-GP), *Arab. J. Sci. Eng.*, 2022, Vol. 47. — P. 629–639.
5. **Yilmaz I.** A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2009, Vol. 46. — P. 1349–1357.
6. **Khandelwal M. and Ranjith P. G.** Correlating index properties of rocks with *P*-wave measurements, *J. Appl. Geophys.*, 2010, Vol. 71. — P. 1–5.
7. **Liu Z., Shao J., Xu W., Wu Q., and Chen H.** Indirect estimation of unconfined compressive strength of carbonate rocks using extreme learning machine, *Acta Geotech.*, 2015, Vol. 10. — P. 651–663.
8. **Kitamura M. and Hirose T.** Strength determination of rocks by using indentation tests with a spherical indenter, *J. Struct. Geol.*, 2017, Vol. 98. — P. 1–11.
9. **Gül E., Ozdemir E., and Sarıci D. E.** Modeling uniaxial compressive strength of some rocks from turkey using soft computing techniques, *Measurement*, 2021, Vol. 171. — 108781.
10. **Teymen A.** Prediction of basic mechanical properties of tuffs using physical and index tests, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, No. 5. — P. 721–733.
11. **Leeb D.** Dynamic hardness testing of metallic materials, *NDT Int.*, 1979, Vol. 12, No. 6. — P. 274–278.
12. **Meulenkamp F. and Grima M. A.** Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1999, Vol. 36. — P. 29–39.
13. **Aoki H. and Matsukura Y.** Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2008, Vol. 67. — P. 23–29.
14. **Viles H., Goudie A., Grab S., and Lalley J.** The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: A comparative analysis, *Earth Surf. Process. Landforms*, 2011, Vol. 36. — P. 320–333.
15. **Lee J. S., Smallwood L., and Morgan E.** New application of rebound hardness numbers to generate logging of unconfined compressive strength in laminated shale formations, 48th US Rock Mechanics-Geomech. Symp., 2014, Vol. 2. — P. 972–978.
16. **Asiri Y., Corkum A., and El Nagggar H.** Leeb hardness test for UCS estimation of sandstone, Paper presented at the 69th Annual Canadian Geotech. Conf., Vancouver, 2016.
17. **Corkum A. G., Asiri Y., El Nagggar H., and Kinakin D.** The Leeb hardness test for rock: an updated methodology and UCS correlation, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2018, Vol. 51. — P. 665–675.
18. **Su O. and Momayez M.** Correlation between Equotip hardness index, mechanical properties and drillability of rocks, *Dokuz Eylül Univ. J. Sci. Eng.*, 2017, Vol. 19, No. 56. — P. 519–531.
19. **Yilmaz Güneş N. and Goktan R. M.** Comparison and combination of two NDT methods with implications for compressive strength evaluation of selected masonry and building stones, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2019, Vol. 78. — P. 4493–4503.

20. **Çelik S. B., Çobanoğlu İ., and Koralay T.** Investigation of the use of Leeb hardness in the estimation of some physical and mechanical properties of rock materials, Pamukkale Univ. J. Eng. Sci., 2020, Vol. 26. — P. 1385–1392.
21. **Aldeeky H., Al Hattamleh O., and Rababah S.** Assessing the uniaxial compressive strength and tangent Young's modulus of basalt rock using the Leeb rebound hardness test, Mater. Constr., 2020, Vol. 70, No. 340. — e230.
22. **Gomez-Heras M., Benavente D., Pla C., Martinez-Martinez J., Fort R., and Brotons V.** Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements, Constr. Build. Mater., 2020, Vol. 261. — 119996.
23. **İnce İ. and Bozdağ A.** An investigation on sample size in Leeb hardness test and prediction of some index properties of magmatic rocks, Arab. J. Geosci., 2021, Vol. 14, No. 3.
24. **Akbay D. and Ekincioğlu G.** Estimating the brittleness values of carbonated rocks with Shore, Schmidt, and Leeb hardness values, Environ. Earth. Sci., 2022, Vol. 81, No. 7.
25. **TS EN 1926.** TürkStandartları, DoğalTaşlarDeneyMetotları, BasınçDayanımıTayini, TSE Publication, Ankara, 2006.
26. **TS EN 2010.** Natural stone test methods-Determination of real density and apparent density and of total and open porosity, Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey, 2010.
27. **ISRM.** Suggested method for determining sound velocity, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr., 1978, Vol. 15, No. 2. — P. 53–58.
28. **ISRM.** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1979, Vol. 16, No. 2. — P. 138–144.
29. **Ulusay R. and Hudson J. A.** International society for rock mechanics (ISRM), the complete ISRM suggested methods for rock characterization, Testing and Monitoring, 1974–2006, Ankara, 2007.

Поступила в редакцию 22/XII 2023

После доработки 25/X 2024

Принята к публикации 08/XI 2024