

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-48-66-70>

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СКАЛЬНОЙ ОПОРЫ В ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Колесников Г.Н.

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

Ключевые слова: горные породы, камерно-столбовая технология, скальные опоры, трещины растяжения, внешнее армирование, хрупкие материалы.

Аннотация. Колонны из бетона и подобных материалов в различном их исполнении относятся к основным элементам современных и исторических наземных сооружений и подземных выработок. При достаточно большой осевой нагрузке в поверхностном слое колонн из хрупких материалов появляются вертикальные трещины растяжения и отколы, что снижает несущую способность конструкции. Обсуждается возможность повышения несущей способности скальных колонн с учетом влияния коэффициента Пуассона. Предложена формула для оценки относительной толщины слоя с трещинами. Рассмотрены аспекты внешнего армирования для повышения несущей способности опор при камерно-столбовой добыче полезных ископаемых. Приведен пример возможной неустойчивости скальной опоры при низких значениях коэффициента Пуассона и высоких значениях латерального давления.

THE INFLUENCE OF EXTERNAL REINFORCEMENT ON CRACK FORMATION IN THE SURFACE LAYER OF A PILLAR IN AN UNDERGROUND WORKING

Kolesnikov G.N.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

Keywords: rocks, room and pillar technology, pillars, tensile cracks, external reinforcement, brittle materials.

Abstract. Columns made of concrete and similar materials in various designs are among the main elements of modern and historical surface structures and underground workings. At a sufficiently large axial load, vertical tensile cracks and spalls appear in the surface layer of columns made of brittle materials, which reduces the bearing capacity of the structure. The possibility of increasing the bearing capacity of rock columns taking into account the influence of Poisson's ratio is discussed. A formula for estimating the relative thickness of the layer with cracks is proposed. Aspects of external reinforcement to increase the bearing capacity of supports in room and pillar mining are considered. An example of possible instability of a rock support at low values of Poisson's ratio and high values of lateral pressure is given.

Введение. Колонны из бетона и подобных материалов в различном их исполнении относятся к основным элементам современных и исторических наземных сооружений и подземных выработок. Колонны, с точки зрения механики, работают в условиях, близких к одноосному сжатию. Примером могут быть колонны в камерно-столбовой системе добычи полезных ископаемых [1]. Характер разрушения образца из розового гранита при одноосном сжатии показывает рисунок 1.

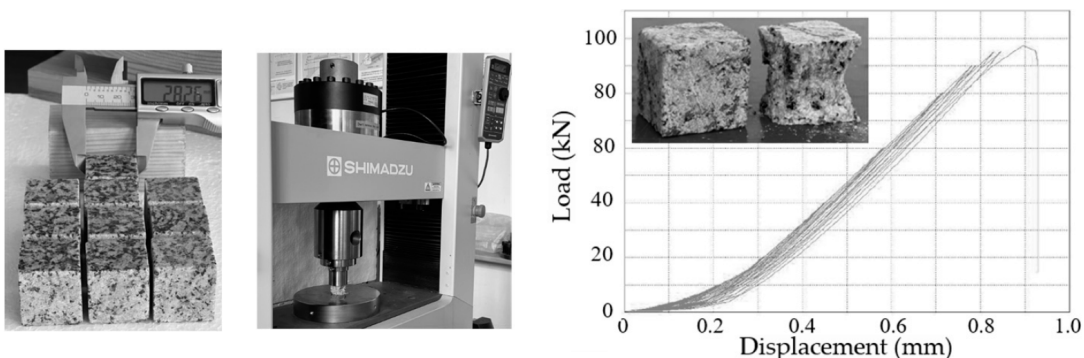


Рис. 1. Испытание образца из розового гранита на одноосное сжатие [2]

При сжатии в поперечных сечениях образца появляются сжимающие напряжения в вертикальном направлении и окружающие растягивающие напряжения. Кроме того, при вертикальной нагрузке появляется боковой распор [3], вызывающий отколы. В итоге разрушение образцов из хрупких материалов часто происходит по типу “песочные часы” (рис. 1). Уменьшение поперечного размера в середине высоты образца снижает его несущую способность. На первой стадии деформирования доминирует влияние растягивающих напряжений, на второй – возрастает влияние касательных напряжений, вызывающих сдвиг и разрушение образца.

Материалы и методы. Чтобы уменьшить влияние трещин растяжения на снижение несущей способности колонн подземных выработок, в настоящее время используют внешнее армирование [1]. Армирование эффективно, если прочность на разрыв армирующих элементов выше, чем у армируемых материалов [4]. Внешнее армирование сопротивляется увеличению поперечных размеров колонны, создавая тем самым боковое давление и повышая несущую способность колонны. Элементы внешнего армирования (тросы и сетки) сопротивляются растяжению и препятствуют появлению вертикальных трещин растяжения в поверхностном слое колонны [5]. Толщину этого слоя обозначим t . В данной работе предполагается, что боковое давление (p) пропорционально осевому сжимающему напряжению (σ_c) с коэффициентом пропорциональности s : $p = s\sigma_c$.

Для колонны круглого поперечного сечения радиусом R , выполненной из материала с коэффициентом Пуассона ν растягивающее окружное напряжение (σ_t) связано с осевым сжимающим напряжением уравнением $\sigma_t = \sigma_c((n-s)R/t - n)$, где $n = \nu/(1-\nu)$. Эта формула получена в [2] для определения окружных растягивающих напряжений в средней части высоты колонны круглого поперечного сечения. Однако она может быть использована и в том случае, если начальная форма поперечного сечения отличается от круга, т.к. эксперименты показывают, что, например, в процессе разрушения образца в форме куба (рис. 1) его поперечное сечение в середине высоты образца, теряя в процессе разрушения свои фрагменты на периметре, приобретает форму, близкую к кругу.

Равенство определенных выше напряжений σ_t пределу прочности материала при растяжении ($\sigma_{t,peak}$) является необходимым условием появления трещин растяжения на боковой поверхности образца при одноосном сжатии. Цель работы заключается в определении максимально допустимого сжимающего напряжения в материале колонны в зависимости от бокового давления и коэффициента Пуассона.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим пример одноосного сжатия гранита, для которого прочность на сжатие и растяжение равна, соответственно, $\sigma_{c,peak}=246$ МПа и $\sigma_{t,peak}=18$ МПа. Вычисления выполним для трех значений коэффициента Пуассона, равных 0,25; 0,20; 0,15 и трех значений указанного выше коэффициента пропорциональности s (табл. 1) при условии, что $t/R=0,25$ во всех рассматриваемых случаях. Предельная нагрузка определена по уравнению $\sigma_c = \sigma_{t,peak} / ((n-s)R/t - n)$ с использованием соотношения $t/R = (n-s)/(n + \sigma_{t,peak}/\sigma_c)$ из [2] и опции «Поиск решения» в MS Excel.

Табл. 1. Коэффициент Пуассона, боковое давление и предел нагрузки

Коэффициент Пуассона, ν	0,25	0,20	0,15	0,25	0,20	0,15	0,25	0,20	0,15
Коэффициент пропорциональности, s	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10
Предел нагрузки, МПа	18	24	34	23	33	55	30	51	139

Результаты вычислений в таблице 1 показывают, что в материале неармированной колонны предельное осевое сжимающее напряжение возрастает от 18 МПа до 34 МПа, если коэффициент Пуассона уменьшается от 0,25 до 0,15. Эти данные прогнозируют существенное влияние коэффициента Пуассона на несущую способность колонны и указывают на целесообразность экспериментальной проверки отмеченной зависимости для обоснования ответа на вопрос о ее применении на практике.

Таблица 1 показывает, что если внешнее армирование создает боковое давление, равное 0,05 от осевого сжимающего напряжения, то предельное значение осевого напряжения возрастает от 18 МПа до 23 Па для $\nu=0,25$, и более значительно, от 34 МПа до 55 МПа, для $\nu=0,15$.

Как показывает таблица 1, возрастает чувствительность максимума несущей способности колонны к изменениям коэффициента Пуассона. Это означает, что небольшие случайные отклонения в свойствах материала колонны или в технологии внешнего армирования могут вызвать аварийную ситуацию. Например, повышение коэффициента пропорциональности от нуля до 0,1 прогнозирует рост предельного напряжения от 34 МПа до 139 МПа, если коэффициент Пуассона равен 0,15 (табл. 1). При этом увеличение коэффициента Пуассона от 0,15 до 0,20 вызывает резкое падение максимального допускаемого напряжения от 139 МПа до 51 МПа, поэтому возможно разрушение скальной опоры.

Уменьшение коэффициента пропорциональности от 0,1 до 0,05 при $\nu=0,15$ вызывает примерно такие же катастрофические последствия, уменьшая предельное напряжение с 139 МПа до 55 МПа.

Заключение. Внешнее армирование скальных колонн – важное направление в повышении эффективности и безопасности камерно-столбовой системы разработки [1, 4, 5]. В статье предложена модель для прогнозирования предельных значений осевого сжимающего напряжения в зависимости от пропорционального бокового давления, создаваемого внешним армированием. Приведенные примеры показали, что армирование повышает несущую способность колонн, однако высокие значения бокового давления повышают также нестабильность состояния и, соответственно, нежелательны с точки зрения безопасности конструкции.

Несмотря на согласованность результатов работы с известными данными [1, 2, 4, 5], необходимо продолжение экспериментальных исследований по теме представленной работы для уточнения данных.

Список литературы

1. Хакимов Ш.И., Уринов Ш.Р. Подэтажная система с искусственными целиками из твердеющей закладки для разработки жил в сложных геомеханических условиях // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, №4. – С. 252-258. – doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258.
2. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure // Applied Sciences. 2024, vol. 14(24), p. 11552. doi.org/10.3390/app142411552.
3. Оловянный А.Г. Боковой распор в массиве горных пород // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 141-147.
4. Qiao Q., Nemcik J., Porter I., Baafi E. Laboratory investigation of support mechanism of thin spray-on liner for pillar reinforcement // Géotechnique Letters. 2014, vol. 4, pp. 317-321.
5. Esterhuizen G.S., Tyrna P.L., Murphy M.M. A Case Study of the Collapse of Slender Pillars Affected by Through-Going Discontinuities at a Limestone Mine in Pennsylvania // Rock Mech Rock Eng. 2019, vol. 52, pp. 4941-4952. doi.org/10.1007/s00603-019-01959-6.

References

1. Khakimov S.I., Urinov S.R. Sublevel stoping with applying artificial hardening stowing pillars for extraction of veins in complicated geotechnical conditions // Mining Science and Technology (Russia). 2021, vol. 6, no. 4, pp. 252-258. doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-252-258.
2. Shekov V., Kolesnikov G. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure // Applied Sciences. 2024, vol. 14(24), p. 11552. doi.org/10.3390/app142411552
3. Olovyanny A.G. Lateral earth pressure in rock mass // Journal of Mining Institute. 2010, vol. 185. pp. 141-147.
4. Qiao Q., Nemcik J., Porter I., Baafi E. Laboratory investigation of support mechanism of thin spray-on liner for pillar reinforcement // Géotechnique Letters. 2014, vol. 4, pp. 317-321.

5. Esterhuizen G.S., Tyrna P.L., Murphy M.M. A Case Study of the Collapse of Slender Pillars Affected by Through-Going Discontinuities at a Limestone Mine in Pennsylvania // Rock Mech Rock Eng. 2019, vol. 52, pp. 4941-4952. doi.org/10.1007/s00603-019-01959-6.

Колесников Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации строительства	Kolesnikov Gennady Nikolayevich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of technology and organization of construction
kgn@petrsu.ru	

Received 09.06.2025