



TUYÊN TẬP BÁO CÁO HỘI NGHỊ TOÀN QUỐC

KHOA HỌC TRÁI ĐẤT VÀ TÀI NGUYÊN VỚI PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG (ERSD 2024)

HÀ NỘI 14 - 11 - 2024

ERSD 2024



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

**TIỂU BAN
ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH – ĐỊA KỸ THUẬT**

MỤC LỤC

3D probabilistic analysis of a rainfall-induced slope failure, a case study of the Mongsen landslide, Sapa, Vietnam <i>Dương Văn Bình</i>	315
Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng xỉ lò cao S95 đến sự gia tăng cường độ của bùn thải trong cải tạo nền công trình khu vực Hải Phòng <i>Bùi Văn Bình</i>	322
Numerical model of intact rock by particle flow code (PFC) <i>Bui Van Binh</i>	329
Evaluation of undrained shear strength of offshore Vietnam clayey soils using PCPT results <i>Truong Thanh Can, Nguyen Quynh Luan</i>	336
Nghiên cứu ảnh hưởng của tro trấu, tro rơm rạ đến tính dẻo của đất <i>Nguyễn Thành Dương, Phạm Thị Ngọc Hà</i>	342
Thí nghiệm cắt khối lớn cho bài toán ổn định mái dốc tự nhiên <i>Nhữ Việt Hà, Bùi Văn Bình, Dương Văn Bình, Trần Vũ Long, Phạm Thị Ngọc Hà</i>	348
Xác định hệ số mất mát thể tích đất (VL) theo kết quả dự báo và quan trắc độ lún mặt đất khi thi công đường hầm bằng khiên đào (TBM) <i>Nguyễn Văn Hiến</i>	354
Research on compressive strength of concrete as building partition wall when using artificial rubber granules to partially replace fine aggregate <i>Nguyen Van Hung, Bui Truong Son, Pham Minh Tan, Bui Van Binh</i>	361
Nghiên cứu lũ bùn đá tại Trà Leng, tỉnh Quảng Nam bằng phần mềm Kanoko 1D và đề xuất giải pháp công trình phù hợp <i>Nguyễn Châu Lâm, Đỗ Tuấn Nghĩa, Phạm Văn Tiền, Nguyễn Trung Kiên, Vũ Văn Kiên, Bùi Tiến Thành, Nguyễn Ngọc Long</i>	367
Xây dựng bản đồ suy thoái độ phù thực vật tại thành phố Đà Lạt tỉnh Lâm Đồng làm cơ sở dữ liệu đánh giá nguy cơ trượt lở đất <i>Nguyễn Thị Nụ, Bùi Trường Sơn</i>	374
Ứng dụng công nghệ điện toán đám mây Google Earth Engine phân tích mức độ biến động thực vật tại thành phố Bảo Lộc tỉnh Lâm Đồng làm cơ sở để đánh giá tai biến địa chất <i>Nguyễn Thị Nụ</i>	381
Tổng quan nghiên cứu trên thế giới về xác định trượt lở đất bằng công cụ viễn thám <i>Nguyễn Thị Nụ</i>	388
Ứng dụng của thí nghiệm xuyên động trong địa kỹ thuật và một số kết quả áp dụng thực tế <i>Nguyễn Văn Phóng</i>	395
Study on the Effects of Pile Group for the Installation of an Oil Platform, Offshore Vietnam <i>Nguyen Van Phong, Le Van Quyen</i>	402

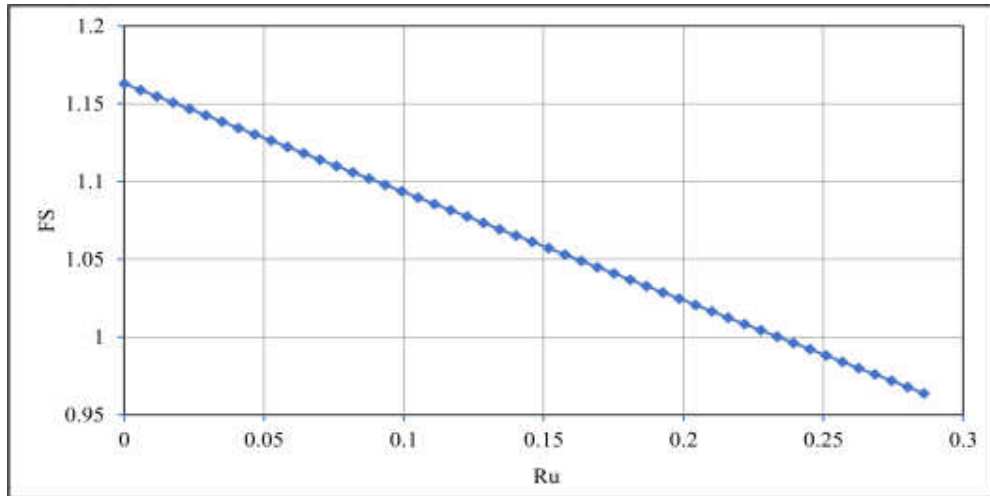


Figure 5. Relationship between pore water pressure ratio and factor of safety

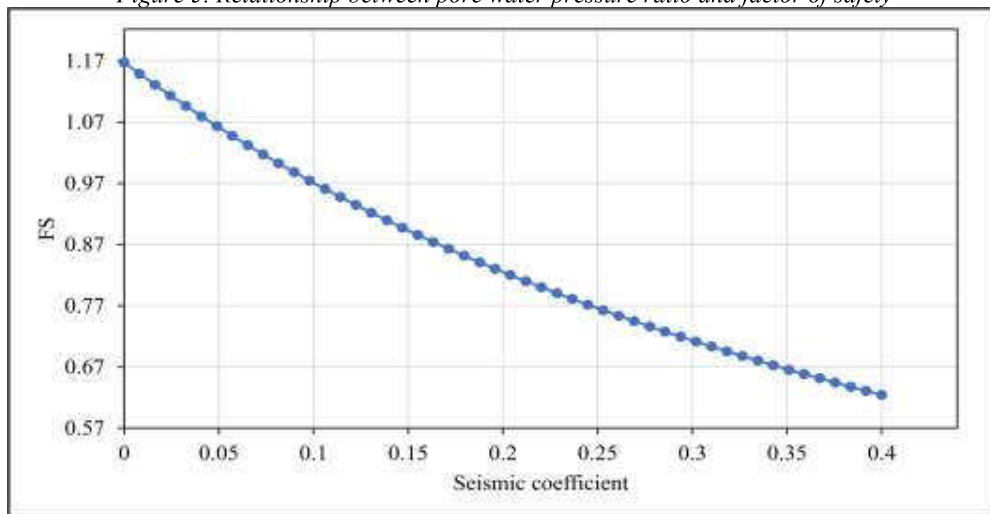


Figure 6. Relationship between seismic coefficient and factor of safety

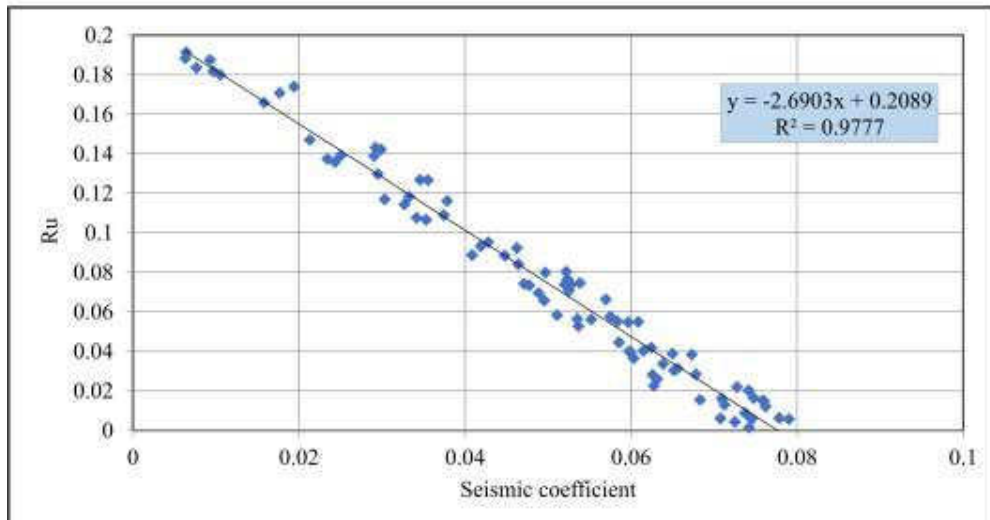


Figure 7. Relationship between pore water pressure ratio and seismic coefficient

5. Conclusions

In this study, a landslide stability probabilistic analysis was conducted in Trung Chai commune, Sapa district, Vietnam, to examine slope behavior under the effect of rainfall. Using 1-meter DEM, the 3-D stability

probabilistic analysis model was built in the Slide 3 program. Even though the factor of safety $FS = 1.258$ during the dry period, the probability of failure $PF = 3.2\%$ indicates that the slope has a high likelihood of instability. Under the influence of rainwater penetration into the soil, the safety factor (FS) decreased from 1.258 to 0.901, corresponding to an increase in the probability of failure (PF) from 3.2% to 80.6%. The analysis results determined that the failure time of the slope and the position of the computed sliding surface were reasonably compatible with the observed failure surface. In addition, the sensitivity analysis results indicate that a single earthquake or heavy rainfall may trigger slope failures. In particular, the landslide hazard for the studied slope or any existing slopes might be significantly increased by the simultaneous effect of these two triggers.

Acknowledgements

For the provision of simulation data, we would like to express our appreciation to the National Science and Technology Project under grant number ĐTĐL.CN-81/21.

References

- Azmoon, B., Biniyaz, A., Liu, Z., & Sun, Y., 2021. Image-Data-Driven Slope Stability Analysis for Preventing Landslides Using Deep Learning. *IEEE Access*, 9: 150623-150636.
- Binh Van Duong, Fomenko I. K., Kien Trung Nguyen, Lien Hong Thi Vi, Zerkal O. V., & Dang Hong Vu, 2022. Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam (in Rus). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333(4): 126-140.
- Bishop, A. W., & Morgenstern, N., 1960. Stability Coefficients for Earth Slopes. *Geotechnique*, 10(4): 129-153.
- Cheng, Y. M., & Yip, C. J., 2007. Three-Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern-Price's Techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12): 1544-1555.
- Dang, K. B., Burkhard, B., Müller, F., & Dang, V. B., 2018. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 16(4): 767-781.
- Fomenko I. K., Gorobtsov D. N., Kurguzov K. V., Novgorodova M. A., & N., S. O., 2021. *The schematization of soil properties in mathematical modeling in engineering geology and geotechnics*. In Reginald E. Hammah, Thamer E. Yacoub, Alison McQuillan, & J. Curran (Eds.). *The Evolution of Geotech - 25 Years of Innovation*. CRC Press. London. 202-209. <https://doi.org/10.1201/9781003188339-27>
- Huang, C.-C., Tsai, C.-C., & Chen, Y.-H., 2002. Generalized Method for Three-Dimensional Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10): 836-848.
- Janbu, N., 1954. Application of composite slip surfaces for stability analysis. Paper presented at the *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*, Stockholm.
- John Read, & Peter Stacey (eds), 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CSIRO Publishing. Melbourne, Australia, 511 pages.
- Kalinin E. V., 2006. *Engineering-geological calculations and modeling*. Moscow University Press. Moscow, 256 pages.
- Liao, Z., Hong, Y., Wang, J., Fukuoka, H., Sassa, K., Karnawati, D., & Fathani, F., 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, 7(3): 317-324.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J., 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2): 239-245.
- Mishra, M., Gunturi, V. R., & Miranda, T. F. D. S., 2019. Slope stability analysis using recent metaheuristic techniques: a comprehensive survey. *SN Applied Sciences*, 1(12): 1674.
- Oh, S., & Lu, N., 2015. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes. *Engineering Geology*, 184: 96-103.
- Pendin V. V., & Fomenko I. K., 2015. *Methodology of landslide hazard assessment and prediction (in Russian)*. Lenand Publishing House. Moscow, 320 pages.
- Pourkhosravani, A., & Kalantari, B., 2011. A Review of Current Methods for Slope Stability Evaluation. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16.

Qiao, X. I. E., Jia-sheng, Z., & Xuan, W., 2020. Research progress of analysis method of slope stability combined with hot spots. Paper presented at the *10th Chinese Geosynthetics Conference & International Symposium on Civil Engineering and Geosynthetics (ISCEG 2020)*, Chengdu, Sichuan, China.

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., & Leong, E. C., 2007. Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12): 1532-1543.

Tien Bui, D., Tuan, T. A., Hoang, N.-D., Thanh, N. Q., Nguyen, D. B., Van Liem, N., & Pradhan, B., 2017. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 14(2): 447-458.

United States Army Corps of Engineers, 1997. *Engineering and Design: Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering*. Department of the Army. Washington, DC, USA, pages.

Wang, L., Wu, C., Tang, L., Zhang, W., Lacasse, S., Liu, H., & Gao, L., 2020. Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method. *Acta Geotechnica*, 15(11): 3135-3150.

TÓM TẮT

Phân tích xác suất 3D trượt lở đất do mưa gây ra, nghiên cứu điển hình tại khối trượt Móng Sến, Sa Pa, Việt Nam

Dương Văn Bình^{1,2}

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

² Nhóm nghiên cứu Địa chất công trình và Địa môi trường

Các vụ trượt lở đất do mưa gây ra thường xuyên xảy ra ở các tỉnh miền núi Việt Nam, gây hậu quả kinh tế xã hội đáng kể. Do đó, các nghiên cứu về trượt lở đất nên được thực hiện một cách có hệ thống, bao gồm ở cả quy mô khu vực và địa phương. Các đánh giá về sự ổn định của từng sườn dốc giải quyết hai loại vấn đề: 1) tính toán sự ổn định để đánh giá sự phát triển của quá trình trượt lở đất nhằm phản ứng với sự thay đổi của các yếu tố kích hoạt lở đất; 2) đánh giá sự thay đổi động học của các điều kiện sườn dốc nhằm phản ứng với sự thay đổi của các yếu tố kích hoạt lở đất. Việc áp dụng rộng rãi các mô hình tiên tiến đã nâng cao đáng kể độ chính xác và độ tin cậy của kết quả đánh giá sự ổn định sườn dốc. Trong nghiên cứu này, một mô hình phân tích xác suất 3D đã được phát triển để phân tích ứng xử của một sườn dốc dưới tác động của mưa lớn ở xã Trung Chải, Sa Pa, Việt Nam. Sự ổn định của sườn dốc được đánh giá dựa trên mối quan hệ giữa hệ số an toàn ($FS = 1,258 \div 0,901$), xác suất phá hủy ($PF = 3,2 \div 80,6\%$) và áp lực nước lỗ rỗng ($Ru = 0 \div 0,286$). Ngoài ra, chỉ số độ tin cậy (RI) được xác định là một yếu tố quan trọng trong việc đánh giá sự ổn định của sườn dốc. Vì huyện Sa Pa nằm trong vùng có hoạt động địa chấn, các trận động đất có thể gây ra trượt lở đất. Do đó, nghiên cứu này đã thiết lập mối quan hệ giữa hệ số địa chấn và giá trị FS, cũng như hệ số địa chấn và áp lực nước lỗ rỗng. Dựa trên các kết quả nghiên cứu, chúng tôi đề xuất các báo cáo phân tích sự ổn định sườn dốc phải bao gồm thêm các giá trị PF và RI. Ngoài ra, việc thiết lập một tiêu chuẩn cho chỉ số độ tin cậy là rất quan trọng, tiêu chuẩn này sẽ được sử dụng để đánh giá xác suất phá hủy cho các dự án khác nhau.

Từ khóa: ổn định mái dốc, trượt lở do mưa, phân tích xác suất, phương pháp phần tử hữu hạn, Sa Pa

Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng xỉ lò cao S95 đến sự gia tăng cường độ của bùn thải trong cải tạo nền công trình khu vực Hải Phòng

Bùi Văn Bình^{1,2,*}

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

² Nhóm nghiên cứu Địa chất công trình và Địa môi trường

TÓM TẮT

Với tốc độ đô thị hóa cũng như sự phát triển của các khu công nghiệp và cơ sở hạ tầng ngày càng cao, vấn đề vật liệu san lấp nền, đất đắp đường đặt ra những thách thức lớn cho công tác khai thác tài nguyên. Do sự thiếu hụt vật liệu san lấp tại các dự án xây dựng ngày càng lớn, đặc biệt ở những khu vực đồng bằng nơi có địa hình trũng thấp, nên yêu cầu tìm kiếm các nguồn vật liệu đắp thay thế cho cát, đất đắp ngày càng cấp thiết. Nhằm tận dụng các vật liệu thải ra từ quá trình sản xuất công nghiệp nặng cũng như tận dụng các vật liệu thải từ quá trình nạo vét kênh mương, luồng lạch, bãi báo đã tiến hành nghiên cứu cải tạo bùn thải bằng xỉ lò cao S95 và xỉ măng để làm vật liệu san lấp nền công trình. Để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng xỉ lò cao S95 đến sự gia tăng cường độ, nhóm nghiên cứu đã tiến hành trộn mẫu bùn thải lấy từ luồng Lạch Huyện trộn với các hàm lượng xỉ S95 và xỉ măng lần lượt là 60kg, 80kg, 110kg, 140kg và 160kg. Các mẫu bùn cải tạo được chế bị với hàm lượng xỉ măng và xỉ lò cao khác nhau. Sau khi chế bị và bảo dưỡng trong điều kiện phòng thí nghiệm, các mẫu được tiến hành xác định cường độ kháng nén ở 7, 14 và 28 ngày tuổi. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng khi hàm lượng xỉ lò cao và xỉ măng tăng thì cường độ kháng nén của mẫu bùn gia cố tăng lên, trong đó cường độ kháng nén tăng từ 77,65 đến 702,79 kPa ở 7 ngày tuổi, và từ 116,44 đến 1186,66 kPa ở 14 ngày tuổi và từ 124,13 đến 1660,64 kPa ở 28 ngày tuổi. Hơn nữa, khi thay đổi tỷ lệ giữa hàm lượng xỉ lò cao S95 và hàm lượng xỉ măng trong từng hàm lượng xỉ và xỉ măng cho thấy rằng hàm lượng xỉ trên xỉ măng từ 40/60 và 50/50 cho kết quả cường độ lớn nhất.

Từ khóa: xỉ lò cao, bùn thải, cải tạo bùn, cứng hóa bùn, xỉ S95

1. Giới thiệu chung

Với tốc độ đô thị hóa cũng như sự phát triển của các khu công nghiệp và cơ sở hạ tầng ngày càng cao, vấn đề vật liệu san lấp nền, đất đắp đường đặt ra những thách thức lớn cho công tác khai thác tài nguyên. Do sự thiếu hụt vật liệu san lấp tại các dự án xây dựng ngày càng lớn, đặc biệt ở những khu vực đồng bằng nơi có địa hình trũng thấp, nên yêu cầu tìm kiếm các nguồn vật liệu đắp thay thế cho cát, đất đắp ngày càng cấp thiết. Nhằm tận dụng các vật liệu thải ra từ quá trình sản xuất công nghiệp nặng cũng như tận dụng các vật liệu thải từ quá trình nạo vét kênh mương, luồng lạch, nhiều nhà khoa học đã thực hiện các nghiên cứu gia cố, cải tạo để sử dụng chúng cho vật liệu đắp. Phương pháp cải tạo bùn nạo vét thành vật liệu san lấp là một trong những ứng dụng tiềm năng nhằm giải quyết được bài toán ô nhiễm môi trường và thiếu hụt vật liệu xây dựng. Phan Văn Kha (2019) đã nghiên cứu tận dụng đất nạo vét luồng lạch tại sông Tiền và sông Hậu kết hợp với tro bay để làm móng kết cấu áo đường ô tô tại Trà Vinh. Kết quả nghiên cứu đã xác chỉ ra rằng hỗn hợp vật liệu đất – tro bay – xỉ măng với hàm lượng 6% và 8% xỉ măng cho mô đun đàn hồi đạt 250 MPa và 287 MPa theo thứ tự, và đạt độ bền cấp III đối với vật liệu là đất gia cố. Vật liệu gia cố đảm bảo sử dụng để làm lớp móng dưới kết cấu áo đường thay cho các lớp cấp phối thiên nhiên và lớp cấp phối đá dăm. Với hàm lượng xỉ măng 2% và 4%, hỗn hợp đất gia cố không đảm bảo yêu cầu cấp độ bền cho vật liệu làm móng kết cấu áo đường. Một số tác giả đã nghiên cứu công nghệ cứng hóa bùn nạo vét để sử dụng trong san lấp mặt bằng thay thế cát (Ngô Anh Quân, 2023). Kết quả nghiên cứu đã đề xuất giải pháp công nghệ vật liệu dùng để cứng hóa đất bùn nạo vét từ sông, kênh bằng chất kết dính vô cơ bao gồm xỉ măng, tro bay, xỉ lò cao và thạch cao và các phụ gia hóa với thành phần cấp phối hợp lý để cứng hóa bùn nạo vét dùng làm vật liệu san lấp mặt bằng và đắp nền đê bao thay thế cho cát. Chất lượng của bùn sau cứng hóa đạt tiêu chuẩn TCVN8219:2009. Nguyễn Quang Phú (2022) đã nghiên cứu cứng hóa đất bùn nạo vét bằng xỉ măng và phụ gia khoáng. Nghiên cứu đã sử dụng các hỗn hợp xỉ măng kết hợp với tro bay và xỉ lò cao

* Tác giả liên hệ

Email: buivanbinh@humg.edu.vn

để cứng hóa bùn ở các vùng nước lợ và nước mặn khu vực Cà Mau. Kết quả nghiên cứu với các tỷ lệ hỗn hợp đất bùn với 6% xi măng và (2, 4, và 6%) xi lò cao và (2, 4, 6%) tro bay cho thấy cường độ của đất bùn tăng từ 12,2% đến 15,4% so với đất bùn cứng hóa bằng xi măng. Điều này cho thấy đất bùn sau cứng hóa có thể sử dụng cho mục đích xây dựng như làm vật liệu thay thế cát để san lấp mặt bằng và đắp bờ bao trong các công trình thủy lợi. Lê Văn Dũng (2022) đã nghiên cứu cải tạo bùn thải thành vật liệu có cường độ cao nhằm thay thế cho đất đắp nền đường và đầu cầu. Nghiên cứu đã đề xuất trộn bùn thải với xi măng và chất tạo bọt để tạo ra hỗn hợp đất gia cố có độ rộng lớn và trọng lượng nhỏ hơn đất đắp thông thường. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi trộn bùn thải với xi măng và chất tạo bọt làm cải thiện cường độ cũng như khối lượng thể tích của hỗn hợp đất gia cố. Hỗn hợp đất được gia cố bằng xi măng và chất tạo bọt đảm bảo được yêu cầu của vật liệu đắp nền đường và đường dẫn đầu cầu. Công ty cổ phần tư vấn đầu tư công trình hàng hải Việt Nam đã áp dụng công nghệ trộn bùn mềm với xi măng sử dụng khí nén hỗn hợp qua đường ống để xử lý bùn thành vật liệu san lấp. Các nghiên cứu tái chế bùn thải kết hợp với các phụ gia dùng làm vật liệu san lấp cho các dạng công trình ngày càng được các nhà nghiên cứu, các nhà quản lý quan tâm thực hiện.

Trên Thế Giới việc sử dụng bùn nạo vét cho mục đích san lấp các công trình cảng, sân bay đã được thực hiện ở nhiều nước như Nhật Bản, Trung Quốc, Singapo và Úc. Ở Nhật Bản, khoảng 180 triệu m³ bùn cát đã được sử dụng cho mục đích san lấp khi xây dựng sân bay quốc tế Kansai (Arai, 1991). Ở Singapo, gần 200 triệu tấn bùn cát nạo vét được sử dụng để xây dựng dự án đảo Changi (Arulrajia và nkk, 2009). Việc sử dụng bùn thải làm vật liệu san lấp cho phép giảm giá thành khi xây dựng công trình. Mặt khác, do nhu cầu sử dụng đất làm vật liệu san lấp ngày càng cao, việc cải tạo bùn nạo vét cho mục đích xây dựng các công trình ven biển ngày càng được quan tâm bởi các nhà nghiên cứu. Việc cải tạo bùn nạo vét không chỉ làm giảm nguy cơ gây ô nhiễm môi trường do các rác thải bùn nạo vét, cũng như công tác nhấn chìm bùn gây ra mà còn đem lại hiệu quả kinh tế cũng như khai hoang các vùng đầm lầy ngập nước cho mục đích phát triển kinh tế. Liu và nkk (2015) đã báo cáo về các đặc tính cũng như sự ổn định của bùn nạo vét và cũng nhấn mạnh triển vọng của nguồn vật liệu này cho mục đích san lấp. Ganesalingam và nkk (2011) đã nghiên cứu các tính chất địa kỹ thuật của bùn nạo vét ở cảng Brisbane, Úc cho mục đích tái chế để làm vật liệu san lấp các công trình mở rộng cảng. Liu và nkk (2022) đã sử dụng xi măng và tro bay để cải tạo bùn nạo vét. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng xi măng và tro bay có hiệu quả cao trong cải tạo bùn và có thể sử dụng tro bay để thay thế một phần xi măng trong việc cải tạo. Nhìn chung, thực tế hiện nay do nhu cầu vật liệu san lấp cho các công trình xây dựng lớn trong khi các nguồn vật liệu có đặc tính phù hợp như cát, sét ngày càng khan hiếm. Do đó, việc tìm các nguồn vật liệu thay thế đang trở lên cấp thiết. Hướng nghiên cứu cải tạo bùn nạo vét để làm vật liệu san lấp, vật liệu đắp đã và đang được nhiều nhà khoa học trên Thế giới quan tâm nghiên cứu.

Nhằm cung cấp những hiểu biết về công tác cải tạo bùn nạo vét, các đặc tính vật lý của bùn, cũng như điều kiện và môi trường thành tạo có ý nghĩa quan trọng đến việc lựa chọn các chất gia cố cải tạo phù hợp. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã thực hiện công tác cải tạo bùn nạo vét lấy từ các cửa sông, luồng lạch khu vực Hải Phòng bằng xi măng kết hợp với xi lò S95. Kết quả nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi măng, xi lò cao S95 đến sự gia tăng cường độ của mẫu bùn nạo sau khi được cải tạo.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nhằm đánh giá được sự gia tăng cường độ của bùn nạo vét sau khi được cải tạo bằng xi măng và xi lò cao, nhóm tác giả đã tiến hành các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm nhằm làm sáng tỏ tính chất hóa lý, cơ học của các mẫu đất bùn nạo vét, mẫu xi lò cao S95 cũng như tính chất cơ học của hỗn hợp bùn sau cải tạo.

2.1. Đặc điểm của bùn nạo vét

Trong nghiên cứu này, các mẫu bùn nạo vét tại các cửa sông, luồng lạch được lấy tại 3 bãi vật liệu khu vực cảng Lạch Huyện. Bùn nạo vét từ các luồng lạch được tích trữ lại trong các bãi ở xung quanh khu vực cảng Lạch Huyện. Nhóm nghiên cứu đã tiến hành lấy các mẫu bùn nạo vét đặc trưng tại 3 bãi lưu trữ bùn, như hình 1. Mỗi bãi vật liệu tiến hành lấy 2 mẫu bùn đặc trưng. Các mẫu bùn đặc trưng sẽ được phân tích các đặc điểm thành phần hạt, khối lượng riêng, độ ẩm giới hạn dẻo và độ ẩm giới hạn chảy. Các thí nghiệm phân tích các chỉ tiêu vật lý của mẫu bùn được thực hiện tại phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật công trình, Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Công tác thí nghiệm xác định các chỉ tiêu vật lý được thực hiện tuân theo tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành. Kết quả thí nghiệm các tính chất của 06 mẫu bùn nạo vét được chỉ ra trong bảng 1.

Kết quả phân tích hạt cho thấy rằng nhóm hạt sét (<0,005 mm) dao động trong khoảng từ 16,4 đến 23,9%, nhóm hạt bụi (0,005-0,05mm) dao động trong khoảng từ 16,9 đến 49,1%. Nhóm hạt cát (0,05-2mm) dao động trong khoảng từ 33,3 đến 66,7%. Độ ẩm giới hạn chảy của mẫu đất dao động từ 29,7% đến 37,5%.

Độ ẩm giới hạn dẻo dao động trong khoảng từ 18,4% đến 24,1%. Với kết quả phân tích thành phần hạt, độ ẩm giới hạn chảy và độ ẩm giới hạn dẻo kết hợp với quan sát lượng hữu cơ, các mẫu đất bùn loãng Lạch Huyện có thể xếp vào loại đất bùn sét pha.



Hình 1. Công tác lấy mẫu tại các bãi lưu trữ bùn nạo vét tại Lạch Huyện, Hải Phòng

Bảng 1. Tính chất vật lý của mẫu bùn nạo vét

TT	Mẫu	Thành phần hạt, P (%) Đường kính nhóm hạt (mm)												Khối lượng riêng Δ (g/cm ³)	Độ ẩm	
															giới hạn chảy W _L (%)	giới hạn dẻo W _p (%)
		>10	10-5	5-2	2-1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25-0,1	0,1 - 0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005				
1	B1-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	4,0	12,3	13,7	38,3	10,8	20,6	2,65	35,2	23,2	
2	B1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	10,4	16,6	19,6	22,8	9,7	19,6	2,63	36,0	22,9	
3	B2-1	0,0	0,0	0,0	2,1	3,5	7,2	12,3	17,6	33,1	5,9	18,3	2,66	29,7	18,4	
4	B2-2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	11,8	21,9	10,6	22,6	7,3	23,9	2,66	37,5	24,1	
5	B3-1	0,0	0,0	0,0	2,1	3,3	6,6	29,1	25,6	11,1	5,8	16,4	2,65	30,1	19,3	
6	B3-2	0,0	0,0	0,0	1,5	1,8	5,1	24,9	25,5	14,7	7,0	19,5	2,67	31,4	18,6	

2.2. Tính chất của xi lò cao nghiền mịn S95 và xi măng

Xi lo cao nghiền mịn S95 hiện nay đã được sử dụng rộng rãi như là một loại phụ gia trong bê tông. Trong nghiên cứu này, xi lò cao nghiền mịn S95 được sử dụng để thay thế một phần xi măng trong việc cải tạo đất bùn nạo vét. Xi lò cao S95 sử dụng trong nghiên cứu là sản phẩm của công ty Cổ phần năng lượng Hòa Phát. Kết quả thử nghiệm mẫu xi lò cao nghiền mịn S95 đã được phân tích tại phòng thí nghiệm VILAS003 thuộc Trung tâm kiểm định vật liệu xây dựng thuộc Viện vật liệu xây dựng cấp ngày 21/09/2022 theo chứng chỉ xuất xưởng của nhà máy. Tính chất của mẫu xi lò cao S95 được thể hiện như trong bảng 2.

Bảng 2. Tính chất của mẫu xi lò cao nghiền mịn S95

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thử
1	Chỉ số hoạt tính cường độ, phần trăm so với mẫu đối chứng:	%	84 115	TCVN11586:2016 (*)
	- 7 ngày			
	- 28 ngày			
2	Tỷ lệ độ lưu động	%	102	TCVN 4030:2003
3	Khối lượng riêng	g/cm ³	288	
4	Bề mặt riêng	cm ² /g	5320	

5	Mất khi nung (LOI)	%	-0,25	TCVN 8265:2009
6	MgO	%	7,86	TCVN 8265:2009 (*)
7	SO ₃	%	0,09	
8	Độ ẩm	%	0,00	
9	Hệ số kiểm tính K	%	1,69	TCVN 4315:2017 (*)
10	Hàm lượng Cl	%	< 0,001	TCVN 141:2008

Loại xi măng được sử dụng trong nghiên cứu là xi măng PCB40 Chinfon. Đây là loại xi măng phổ biến ở khu vực Hải Phòng.

2.3. Phương pháp gia cố và bảo dưỡng mẫu trong phòng thí nghiệm

Nhằm mục đích nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng xi lò cao S95 đến sự gia tăng cường độ của đất bùn nạo vét, hàm lượng xi lò cao S95 sẽ được thay thế một phần xi măng với tỷ lệ xi măng trên xi lò cao. Tỷ lệ xi lò cao S95 thay thế xi măng được nghiên cứu lần lượt là 20%, 40%, 50%, 60%. Mặt khác, dựa vào các nghiên cứu của Phan Văn Kha (2019), Ngô Anh Quân (2023), và các kinh nghiệm khi thiết kế hàm lượng xi măng phổ biến thường dùng trong thiết kế cọc Đất- Xi măng trong các dự án giao thông hiện nay cùng với mục đích của việc cải tạo đất bùn nạo vét dùng làm vật liệu san lấp, hàm lượng xi măng kết hợp với xi lò cao được lựa chọn là 80, 110 và 140 kg/m³, chi tiết tỷ lệ các hàm lượng thành phần được thể hiện trong bảng 3. Tỷ lệ nước trên xi măng bằng 1. Các mẫu đất bùn nạo vét tại các bãi vật liệu được trộn đều với nhau và lấy mẫu đại diện trước khi được gia cố bằng xi măng và xi lò cao S95. Quy trình chế bị mẫu và bảo dưỡng được thực hiện theo phương pháp chế bị ướt theo tiêu chuẩn TCVN9403-2012. Theo quy trình này, mẫu bùn được phơi khô gió và được tán nhỏ và sàng qua rây 0,5mm. Sau đó cân các hàm lượng theo cấp phối đã được đề xuất ở trên. Các hợp phần được trộn đều với nhau theo các tổ hợp mẫu. Sau đó mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện nhiệt độ phòng trong khoảng 3 ngày. Sau 3 ngày mẫu được tháo khuôn và bảo dưỡng trong môi trường nước ở nhiệt độ phòng để thí nghiệm ở các ngày tuổi 7, 14 và 28 ngày.

Bảng 3. Hàm lượng xi lò cao S95 và xi măng gia cố

TT	Tên mẫu	Hàm lượng XM+S95 kg/cm ³	Tỷ lệ XM/S95		Khối lượng đất khô gió (kg)	Khối lượng XM (g)	Khối lượng xi S95 (g)	Tỷ lệ N / XM (g)
			XM	S95				
1	M2.1	80	40	60	2,743	67,8584	101,7876	1
	M2.2		50	50	2,743	84,8230	84,8230	
	M2.3		60	40	2,743	101,7876	67,8584	
	M2.4		80	20	2,743	135,7168	33,9292	
2	M3.1	110	40	60	2,743	93,3053	139,9580	1
	M3.2		50	50	2,743	116,6316	116,6316	
	M3.3		60	40	2,743	139,9580	93,3053	
	M3.4		80	20	2,743	186,6106	46,6527	
3	M4.1	140	40	60	2,743	118,7522	178,1283	1
	M4.2		50	50	2,743	148,4403	148,4403	
	M4.3		60	40	2,743	178,1283	118,7522	
	M4.4		80	20	2,743	237,5044	59,3761	

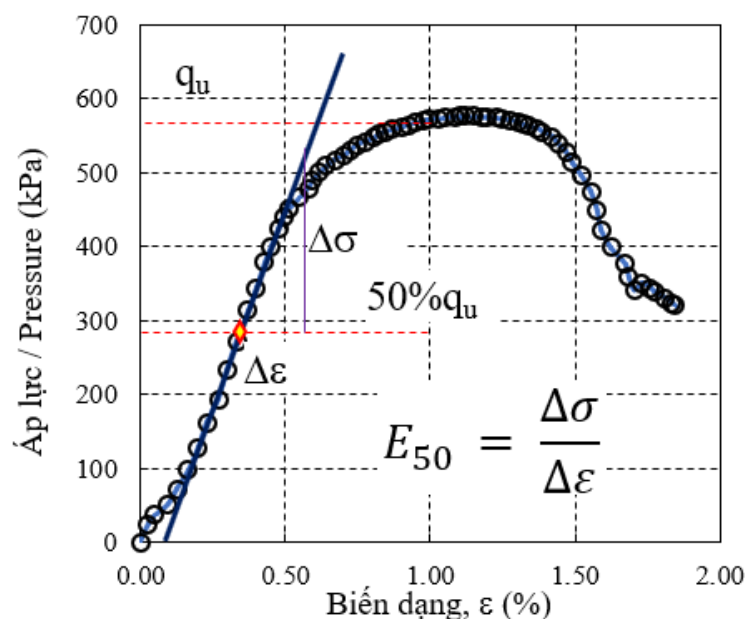
Mỗi tổ hợp mẫu tương ứng với các tỷ lệ xi măng trên xi lò cao S95 sẽ được chế bị 9 thời mẫu và được bảo dưỡng trong điều kiện phòng thí nghiệm. Các mẫu sẽ được xác định cường độ dựa trên thí nghiệm nén đơn trục nở hông tự do tại các thời điểm bảo dưỡng 7, 14 và 28 ngày. Thí nghiệm xác định cường độ kháng nén trong điều kiện nở hông tuân thủ theo tiêu chuẩn TCVN9403-2012 và tiêu chuẩn ASTM D2166. Giá trị cường độ kháng nén (qu) và mô đun đàn hồi (E₅₀) sẽ được xác định dựa trên kết quả thí nghiệm, như trong hình 2.

3. Kết quả và thảo luận

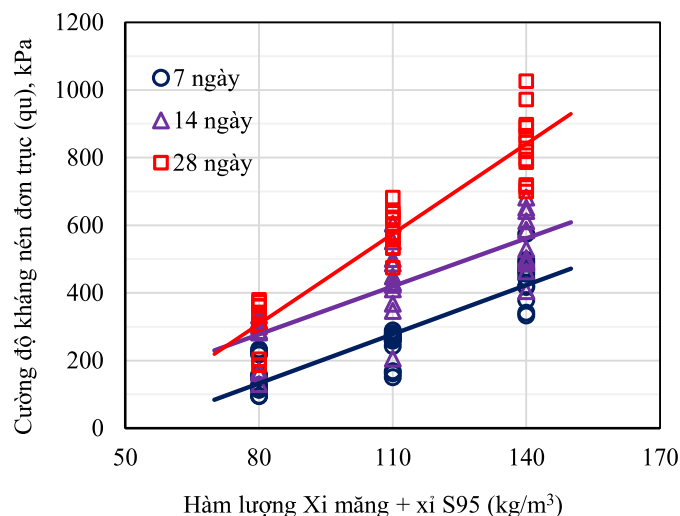
3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng - xi lò cao S95 đến cường độ của bùn nạo vét sau cải tạo

Kết quả thí nghiệm với hàm lượng xi măng và xi lò cao S95 lần lượt là 80, 110 và 140 kg/m³ cho thấy dự gia tăng mạnh cường độ kháng nén của hỗn hợp bùn nạo vét sau cải tạo. Kết quả cường độ kháng nén của hỗn hợp bùn sau cải tạo tại 7, 14 và 28 ngày được thể hiện trong hình 3. Cường độ kháng nén ở 28 ngày của mẫu bùn nạo vét khi hàm lượng xi măng và xi S95 xử lý với 80 kg/m³ thay đổi từ 186,0 đến 380,0 kPa. Cường độ kháng nén ở 28 ngày của mẫu bùn nạo vét khi hàm lượng xi măng và xi S95 xử lý với 110 kg/m³ thay đổi từ 474,9 đến 681,85 kPa. Cường độ kháng nén ở 28 ngày của mẫu bùn nạo vét khi hàm lượng xi măng và xi S95 xử lý với 140 kg/m³ thay đổi từ 700,3 đến 1036,3 kPa. Với sự gia tăng cường độ khá lớn

của hỗn hợp bùn sau cải tạo, điều này cho thấy tiềm năng cải tạo bùn nạo vét để làm vật liệu san lấp. Tùy thuộc vào yêu cầu về cường độ của vật liệu san lấp để có thể lựa chọn hàm lượng xi măng – xi lò cao S95 hợp lý.



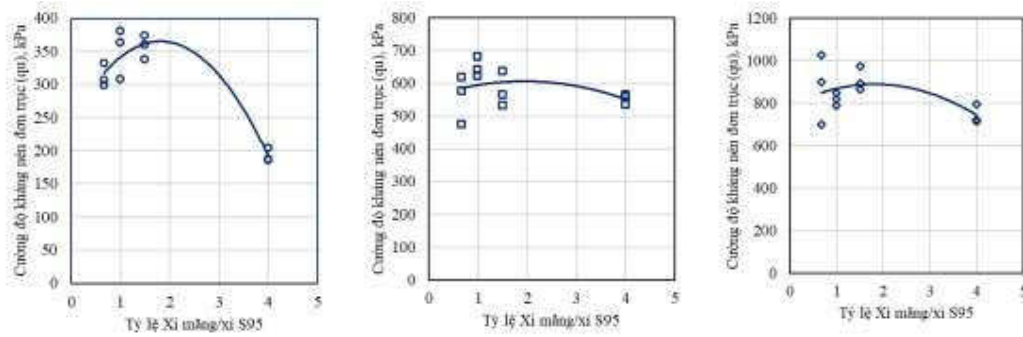
Hình 2. Xác định giá trị cường độ kháng nén (q_u) và mô đun đàn hồi (E_{50}) từ kết quả nén đơn trục



Hình 3. Cường độ kháng nén của mẫu bùn sau cải tạo

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng xi lò cao S95 đến cường độ của bùn nạo vét sau cải tạo

Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng tỷ lệ xi lò cao S95 thay thế xi măng có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ kháng nén của hỗn hợp bùn nạo vét sau cải tạo. Cường độ kháng nén của mẫu bùn sau cải tạo gia tăng đáng kể khi tỷ lệ thay thế xi lò cao gia tăng. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi tỷ lệ xi lò cao S95 thay thế xi măng từ 40-60% cho kết quả cường độ kháng nén cao hơn so với cường độ kháng nén của mẫu có tỷ lệ thay thế thấp. Hình 4a cho thấy khi hàm lượng xi măng – xi S95 là 80 kg/m^3 ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế thể hiện rõ ràng nhất. Tỷ lệ xi măng / xi S95 từ 0,67 tới 1,5% cường độ kháng nén của mẫu bùn sau cải tạo lớn hơn so với mẫu có tỷ lệ xi măng / xi S95 bằng 4. Với hàm lượng xi măng – xi S95 từ 110, và 140 kg/m^3 cường độ mẫu với tỷ lệ xi măng / xi S95 thể hiện quy luật không rõ ràng. Tuy nhiên, cường độ kháng nén của mẫu cho giá trị gần như tương đương. Điều này cho thấy triển vọng lớn về khả năng sử dụng xi lò cao S95 để thay thế một phần xi măng trong lĩnh vực cải tạo bùn nạo vét. Tỷ lệ thay thế có thể lên đến 60%.



(a) Hàm lượng XM-S95 là 80kg/m^3

(b) Hàm lượng XM-S95 là 110kg/m^3

(c) Hàm lượng XM-S95 là 140kg/m^3

Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ lệ Xi măng / xi S95 đến cường độ kháng nén của mẫu bùn sau cải tạo

4. Kết luận

Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng – xi lò cao cũng như tỷ lệ thay thế xi lò cao S95 cho một phần xi măng đã được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy cường độ của mẫu bùn nạo vét gia tăng mạnh khi được cải tạo với hàm lượng xi măng và xi lò cao S95 lần lượt là 80, 110, 140 kg/m^3 . Cường độ kháng nén thay đổi từ 186.0 đến 1036.3 kPa khi hàm lượng xi măng và xi S95 lần lượt là 80, 110, 140 kg/m^3 .

Ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế xi S95 cho xi măng cho thấy khi tỷ lệ thay thế từ 40-60% cường độ của mẫu hỗn hợp gia cố cho giá trị lớn hơn. Điều này cho thấy khả năng sử dụng xi lò cao S95 thay thế 1 phần xi măng trong lĩnh vực cải tạo bùn nạo vét.

Bước đầu kết quả nghiên cứu cho thấy triển vọng lớn của việc sử dụng xi lò cao S95 thay thế một phần xi măng. Tuy nhiên, với số lượng mẫu nghiên cứu còn tương đối hạn chế, vì vậy cần tiến hành nghiên cứu sâu hơn để đánh giá đầy đủ bản chất, cơ chế của sự gia tăng cường độ của mẫu sau khi cải tạo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hỗ trợ bởi Trường Đại học Mở - Địa chất thông qua đề tài cấp cơ sở mã số T24-15 Phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật công trình, Trường Đại học Mở - Địa chất đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện các thí nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- Arai Y., 1991. Construction of an artificial offshore island for the Kansai International Airport, Special lecture. GEOCOST 91, Yokohama, 1-17.
- Arulrajah A., Bo M. W., Chu J. and Nikraz H., 2009. Instrumentation at Changi land reclamation project, Singapore. Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering, 162(1): 33-40.
- Ngô Anh Quân, 2023. *Nghiên cứu công nghệ cứng hóa đất bùn nạo vét để sử dụng trong san lấp mặt bằng thay thế cát*. Đề tài khoa học công nghệ độc lập cấp Quốc gia, mã số ĐTĐL.CN-33/19.
- Nguyễn Quang Phú, 2022. Nghiên cứu cứng hóa đất bùn nạo vét bằng xi măng và phụ gia khoáng. *Tạp chí KHCN xây dựng*. Số 3/2022.
- Lê Văn Dũng, 2022. Nghiên cứu phương pháp cải tạo bùn thải thành vật liệu thay thế cho đất đắp nền đường, đường đầu cầu. Kỷ yếu hội thảo khoa học Kiến trúc và xây dựng hướng đến phát triển bền vững lần IV 2022.
- Liu W.B., Chen Q.S., Chiaro G. and Jiang H.M., 2015. Effect of a cement-lignin agent on the shear behavior of Shanghai dredged marine soils. *Marine Georesources & Geotechnology*. DOI:10.1080/1064119X.2015.1024903.
- Liu, Yaxu, Dominic EL Ong, Erwin Oh, Zhuang Liu, and Ross Hughes, 2022. "Sustainable cementitious blends for strength enhancement of dredged mud in Queensland, Australia." *Geotechnical Research* 9, no. 2 (2022): 65-82.
- Ganesalingam, Dhanya, Arul Arulrajah, Jayantha Ameratunga, Peter Boyle, and Nagaratnam Sivakugan, 2011. Geotechnical properties of reconstituted dredged mud, 1.
- Phan, V. K., 2019. *Nghiên cứu tận dụng đất nạo vét từ dự án luồng tàu biển nối sông Tiền vào sông Hậu gia cố kết hợp tro bay làm móng kết cấu áo đường ô tô tại tỉnh Trà Vinh*. Doctoral dissertation, Trường Đại học Bách khoa-Đại học Đà Nẵng.

ABSTRACT

Effect of the Blast furnace slag S95 content on the strength of dredged mud in enhanced foundation in Hai Phong area

Bui Van Binh^{1,2}

¹*Hanoi University of Mining and Geology*

²*Research group of Engineering Geology and Geo-environment*

With rapid urbanization and the increasing development of industrial zones and infrastructure, the issue of filling materials for foundation and road embankments presents significant challenges for resource extraction. Due to the growing shortage of fill materials in construction projects, especially in low-lying delta areas, finding alternative sand and embankment soil materials is becoming increasingly urgent. To utilize waste materials from heavy industrial production as well as materials from dredging canals and channels, this paper investigates the use of S95 blast furnace slag and cement to stabilize sludge for use as foundation fill material. To study the effect of S95 blast furnace slag content on strength improvement, the research team mixed sludge samples taken from the Lach Huyen channel with different contents of S95 slag and cement, specifically 60kg, 80kg, 110kg, 140kg, and 160kg. The stabilized sludge samples were prepared with varying cement and slag contents. After preparation and curing under laboratory conditions, the samples were tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days. The results indicate that as the content of slag and cement increased, the compressive strength of the stabilized sludge samples also increased, with compressive strength ranging from 77,65 to 702,79 kPa at 7 days, 116,44 to 1186,66 kPa at 14 days, and 124,13 to 1660,64 kPa at 28 days. Furthermore, altering the ratio between the S95 slag content and the cement content within each slag and cement mixture showed that the ratio of slag to cement of 40/60 and 50/50 yielded the highest strength results.

Keywords: blast furnace slag, sludge, sludge stabilization, sludge solidification, S95 slag

Numerical model of intact rock by particle flow code (PFC)

Bui Van Binh^{1,2,*}

¹ Hanoi University of Mining and Geology

² Research group of Engineering Geology and Geo-environment

ABSTRACT

The numerical modeling method for studying the complex behavior of rock masses has been and continues to be implemented by many scientists. A rock mass model is a combination of two basic models: the intact rock model and the model simulating the properties of fracture systems, bedding planes, and foliations. In the Particle Flow Code (PFC) method, intact rock is simulated by an assembly of spherical particles that are bonded together. Therefore, in practice, determining the parameters that reflect the bonds between particles is a challenging issue for researchers. Currently, no specific experiment can fully determine the components that reflect the bonding between minerals or rock particles. Most of the bonds between particles in the PFC method are determined through a trial-and-error approach to ensure that the strength, deformation characteristics, and failure modes of the model closely match the results of laboratory experiments. In this study, the author uses the design of experiments (DOE) method to determine the parameters reflecting the bonds between particles to facilitate the simulation of rock and rock masses using the PFC method. The research results show that the behavior of the rock model is consistent with the behavior of rock samples in laboratory tests. The values of compressive strength, elastic modulus, and Poisson's ratio for the laboratory-tested rock samples and the modeled rock samples are 71.9 MPa (UCS), 36.7 GPa (E), 0.22 (ν) and 72.75 MPa (UCS), 35.94 GPa (E), 0.23 (ν), respectively. The research results demonstrate that the design of the experiment method can be effectively employed to help engineers simulate rock properties in the PFC method.

Keywords: particle flow code, Numerical model, intact rock

1. Introduction

There are several methods for modeling rock and rock masses, among which the Particle Flow Code (PFC) method simulates the mechanical behavior of rock and rock masses based on an assembly of particles, with bonds between the particles represented by bond models. A series of complex microstructural parameters characterize the bonds between the particles. These microstructural parameters are often not easily determined through laboratory experiments but are typically identified through a model calibration process that seeks to match the behavior of the numerical model with that of laboratory rock samples. This process is inherently complex, often involving multiple iterations of trial and error, which can be time-consuming and somewhat simplistic.

Currently, some researchers have applied statistical algorithms and artificial intelligence to determine the microstructural parameters that characterize the bonds between particles in rock material simulations. This study applies the design of experiments (DOE) method and regression analysis to determine the microstructural parameters for modeling rock material.

2. Methodology

2.1. Contact models of particle flow code

Particles in the PFC model interact at contacts using a generalized internal force. Contact mechanics is embodied in particle-interaction laws that employ a soft-contact approach, for which all deformation occurs at the contacts between the rigid bodies as shown in Figure 1a. The particle-interaction laws are referred to as Contact Models. Several contact models have been proposed. The most popular contact model is a linear parallel bond model. The linear parallel bond model with inactive dashpots and a reference gap of zero corresponds with the parallel-bond model of [Potyondy2004]. A parallel bond provides the mechanical

*Tác giả liên hệ

Email: buivanbinh@humg.edu.vn

A parallel bond can be envisioned as a set of elastic springs with constant normal and shear stiffnesses, uniformly distributed over a cross-section lying on the contact plane and centered at the contact point. These springs act in parallel with the springs of the linear component. Relative motion at the contact, occurring after the parallel bond has been created, causes a force and moment to develop within the bond material. This force and moment act on the two contacting pieces and can be related to maximum normal and shear stresses acting within the bond material at the bond periphery. If either of these maximum stresses exceeds its corresponding bond strength, the parallel bond breaks, and the bond material is removed from the model along with its accompanying force, moment, and stiffnesses. The linear parallel bond model provides the behavior of two interfaces: an infinitesimal, linear elastic (no-tension), and frictional interface that carries a force and a finite-size, linear elastic, and bonded interface that carries a force and moment as shown in Figure 1b.

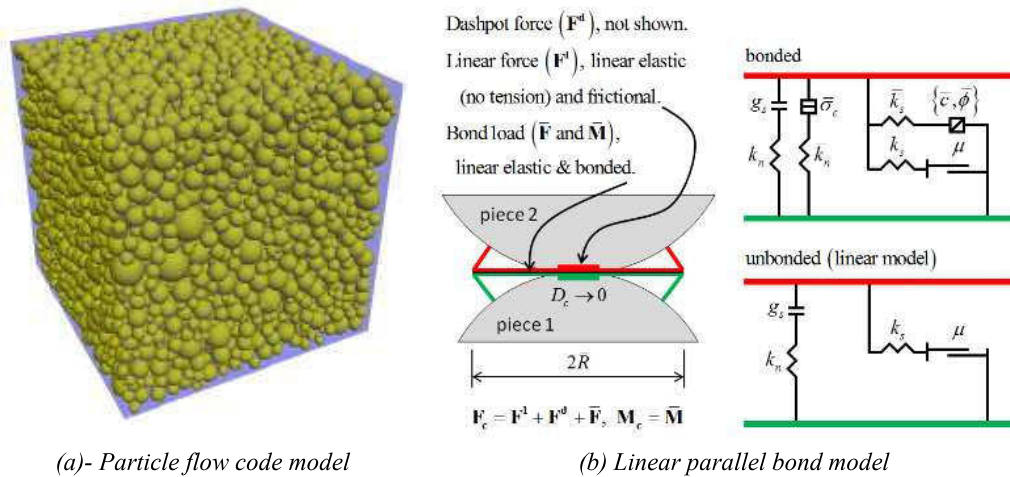


Figure 1. Particle flow code model and Contact bond model (Itasca, 2014)

The linear Parallel bond model consists of a system of micro-parameters such as particle density, porosity (ρ), minimum particle radius, particle radius ratio ($R_{\max}/R_{\min}$), particle contact modulus (E^*), particle normal to shear stiffness ratio (k_n/k_s), particle friction coefficient (μ), particle-bond radius multiplier (λ), parallel-bond effective modulus ($\bar{E}^*$), bond normal to shear stiffness ratio ($\bar{k}_n/\bar{k}_s$), tensile strength ($\bar{\sigma}_c$), cohesion ($\bar{c}$), and friction angle. These microstructural parameters cannot be directly determined from laboratory experiments. The process of identifying these parameters is highly complex and typically involves a series of trials through uniaxial and triaxial compression test models to achieve behaviors that closely match those of the rock sample being simulated. This process is very time-consuming.

2.2. Design of experiment method (DOE)

DOE is defined as a structured, organized method for determining the relationship between factors affecting a process and the output of that process. An experimentalist changes one or several process variables (factors) to observe the effect the changes have on one or several response variables DOE is an efficient procedure for planning experiments so that the results obtained can be analyzed to yield valid and objective conclusions. DOE begins with determining the objectives of an experiment and selecting the process variables for the study.

In this method, each input variable is determined within a predefined range of values. Then, a series of experiments is conducted based on combinations of these variables to obtain corresponding target results. Based on a series of target results from the combinations of variables, we analyze the data to establish regression functions. By performing optimization calculations on the objective functions based on the predetermined results, we can obtain the optimal values for the input variables. This method will be used to determine the microstructural parameters of the linear parallel bond model so that the uniaxial compression test results on the model match the uniaxial compression test results of the rock sample obtained from laboratory experiments.

3. Numerical results

In this study, the fine-grained sandstone with medium compressive strength is chosen to represent the intact rock. The properties of fine-grained sandstone under the uniaxial compression test are the uniaxial compression strength of (UCS) 71.97 MPa, Young's modulus (E_{50}) of 36.7 GPa, and Poisson's ratio (ν) of 0.22, as illustrated in Fig.2. The micro-parameters of the linear parallel bond model in PFC3D are determined by the calibration approach based on the work of Yoon (2007) that is carried out by the experimental design and optimization, and the suggestion of Ma and Huang (2018) to promote the linear parallel contact bond model. Because this study focuses on a large-scale engineering problem, the specimen size for numerical calibration is chosen to be $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$. Based on the relationship between several micro-parameters and macro-properties of the rock (Yoon 2007), we chose a certain range of each micro-parameters corresponding to the properties of the fine grained sandstone. The range of each micro-parameter is divided into three levels including lower, middle, and upper levels, as called the uncoded values. Three levels are coded by the coded values of -1, 0, and 1, respectively as represented in Table 1.

Table 1. Range of micro-parameters for calibration of the parallel bond model

Micro-parameters	Uncoded values of each level			Transformation from coded to uncoded
	-1	0	1	
Particle contact modulus, E^* (GPa)	15	25	35	Uncoded = $10 \times \text{coded} + 25$
Particle normal to shear stiffness ratio, k_n/k_s	1	2.5	4	Uncoded = $1.5 \times \text{coded} + 2.5$
Particle friction coefficient, μ (-)	0.25	0.5	0.75	Uncoded = $0.25 \times \text{coded} + 0.5$
Tensile strength, $\bar{\sigma}_c$ (MPa)	10	25	40	Uncoded = $15 \times \text{coded} + 25$
Cohesion, $\bar{c}$ (MPa)	20	40	60	Uncoded = $20 \times \text{coded} + 40$
Particle radius ratio, $R_{\max}/R_{\min}$	1.3	1.5	1.7	Uncoded = $0.2 \times \text{coded} + 1.5$

The Plackett-Burman (PB) (Plackett and Burman 1946, Rodrigues and Iemma 2014) design method is adopted to design the experimental system. The analysis in PB design uses the values of each lower and upper level. Because there are six variables needed for calibration of the parallel bond contact model, the reasonable number of trials would be 12 (PB12) (Rodrigues and Iemma 2014). The design matrix for Plackett-Burman design takes advantage of the work of Yoon (2007), as described in Table 2.

Table 2. Plackett-Burman design matrix (Yoon 2007)

No. trials	E^*	k_n/k_s	μ	$\bar{\sigma}_c$	$\bar{c}$	$R_{\max}/R_{\min}$
1	-1	1	1	1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	1
4	1	-1	-1	-1	1	-1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	-1	1	1	1	-1
7	1	1	1	-1	-1	1
8	1	1	-1	-1	-1	-1
9	1	-1	-1	1	-1	1
10	-1	1	-1	1	1	-1
11	-1	-1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	1	-1	1	1

Based on the PB design matrix, twelve uniaxial compression tests are simulated in the PFC^{3D} medium. The macro-properties involving UCS, Young's modulus (E_{50}), and Poisson's ratio (ν) are represented in Table 3.

Table 3. Macro-properties corresponding to 12 trials

No. trials	Micro-parameters of the parallel bond model						Macro-properties		
	E*	kn/ks	μ	$\bar{\sigma}_c$	$\bar{c}$	R _{max} /R _{min}	UCS (MPa)	E* (GPa)	ν
1	-1	1	1	1	-1	-1	97.88	22.67	0.26
2	-1	-1	-1	1	-1	1	35.44	32.83	0.13
3	-1	1	-1	-1	1	1	45.80	22.16	0.28
4	1	-1	-1	-1	1	-1	118.56	75.30	0.12
5	1	1	1	1	1	1	242.29	58.08	0.26
6	1	-1	1	1	1	-1	211.58	98.80	0.08
7	1	1	1	-1	-1	1	53.81	57.78	0.27
8	1	1	-1	-1	-1	-1	46.56	55.28	0.29
9	1	-1	-1	1	-1	1	36.48	81.69	0.15
10	-1	1	-1	1	1	-1	212.99	22.13	0.28
11	-1	-1	1	-1	-1	-1	42.57	36.14	0.07
12	-1	-1	1	-1	1	1	140.10	36.10	0.07

Macro-properties obtained from twelve trials are analyzed to determine the effect and coefficients of each micro-parameters impacting the macro-properties, as represented in Table 4.

Table 4. Analyzed results of PB design

Variables	UCS		Young's modulus (E ₅₀)		Poisson's ratio (ν)	
	Effect ^a coeff. ^b	p-value	Effect ^a coeff. ^b	p-value	Effect ^a coeff. ^b	p-value
Constant	NA		NA		NA	
	107.01	0.000	49.914	0.000	0.1883	0.000
E*	22.42		42.483		0.0133	
	11.21	0.294	21.24	0.001	0.0067	0.022
kn/ks	19.10		-20.461		0.1700	
	9.55	0.362	-10.23	0.008	0.0850	0.000001
μ	48.73		3.362		-0.0400	
	24.37	0.059	1.68	0.468	-0.0200	0.00039
$\bar{\sigma}_c$	64.87		5.571		0.0100	
	32.44	0.025	2.79	0.255	0.0050	0.052
$\bar{c}$	109.76		4.362		-0.0133	
	54.88	0.004	2.18	0.358	-0.0067	0.022
R _{max} /R _{min}	-29.37		-3.614		0.0100	
	-14.69	0.189	-1.81	0.438	0.0050	0.052
R-sq (%)	92.19		96.30		99.79	
Effect ^a value is used to determine the relative strength of influence of a factor on a response.						
Coeff. ^b is used to construct linear regression fittings, which are later used as linear equality constraints.						

The relationships between UCS, E*, ν and micro-parameters are constructed based on constants and coefficients under linear regression, as follows:

$$\text{UCS} = 107.01 + 11.21E^* + 9.55\text{kn/ks} + 24.37\mu + 32.44\bar{\sigma}_c + 54.88\bar{c} - 14.69R_{\text{max}}/R_{\text{min}} \quad (1)$$

$$E_{50} = 49.914 + 21.24E^* - 10.23\text{kn/ks} + 1.68\mu + 2.79\bar{\sigma}_c + 2.18\bar{c} - 1.81R_{\text{max}}/R_{\text{min}} \quad (2)$$

$$\nu = 0.1883 + 0.0067E^* + 0.085\text{kn/ks} - 0.02\mu + 0.005\bar{\sigma}_c - 0.0067\bar{c} + 0.005R_{\text{max}}/R_{\text{min}} \quad (3)$$

The optimization with the objective function of UCS equality constraints of E₅₀, ν and side constraints is conducted to predict the micro-parameters based on the results of uniaxial compression laboratory test. The optimal set of micro-parameters of the linear parallel bond model is indicated in Table 5. Its stress-strain curve and mechanical properties under the uniaxial compressive test are illustrated in Fig.2. The numerical simulation by PFC^{3D} with these micro-parameters agrees well with the experimental results, as indicated in Fig. 2. Further, the tensile test and the tri-axial compression simulations are conducted, as shown in Fig.3. The tensile strength from the numerical simulation is 13.6 MPa. The ratio of the uniaxial compressive strength (UCS) and the tensile strength is 5.35. This ratio lies in a normal range of 5 – 10 (Diambra et al. 2018). It is consistent with the real ratio. Fig.3 shows that the axial strength increases with the increase in confining pressure. From the numerical uniaxial and tri-axial compressive tests, the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria are adopted to predict the failure envelope of the intact rock, as shown

in Fig.4. The shear strength of the intact rock is the cohesion of 16.94 MPa and the frictional angle of 44.79°.

Table 5. Micro-parameters of the linear parallel bond model

Micro-mechanical parameters	Values
Particle density, (kg/m ³)	2650
Porosity, ρ	0.2
Minimum particle radius (m)	0.133
Particle radius ratio, $R_{\max}/R_{\min}$	1.5
Particle contact modulus, E^* (GPa)	20.5
Particle normal to shear stiffness ratio, k_n/k_s	3.0
Particle friction coefficient, μ	0.50
Parallel-bond radius multiplier, λ	1.0
Parallel-bond effective modulus, $\bar{E}^*$ (GPa)	20.5
Bond normal to shear stiffness ratio, $\bar{k}_n/\bar{k}_s$	3.0
Tensile strength, $\bar{\sigma}_c$ (MPa)	15.0
Cohesion, $\bar{c}$ (MPa)	35.0
Friction angle (degree)	0

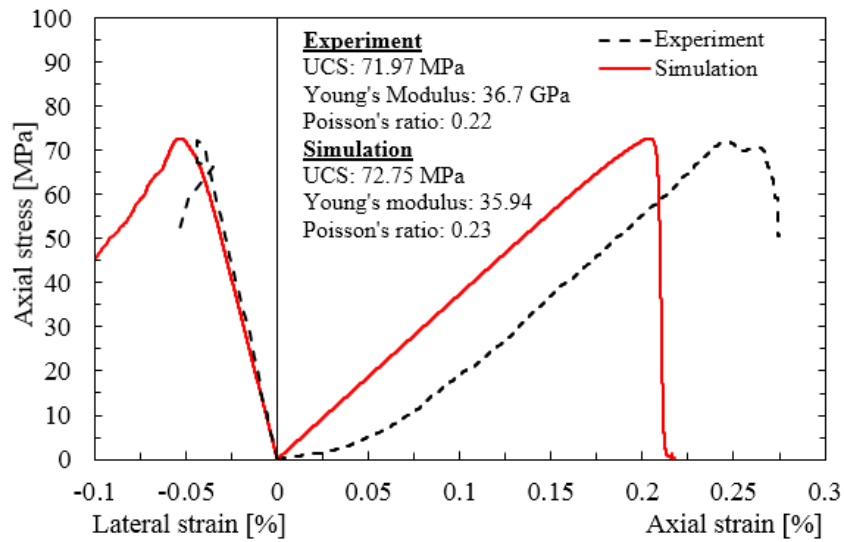


Fig. 2. Uniaxial compression curves from the experiment and PFC^{3D} simulation

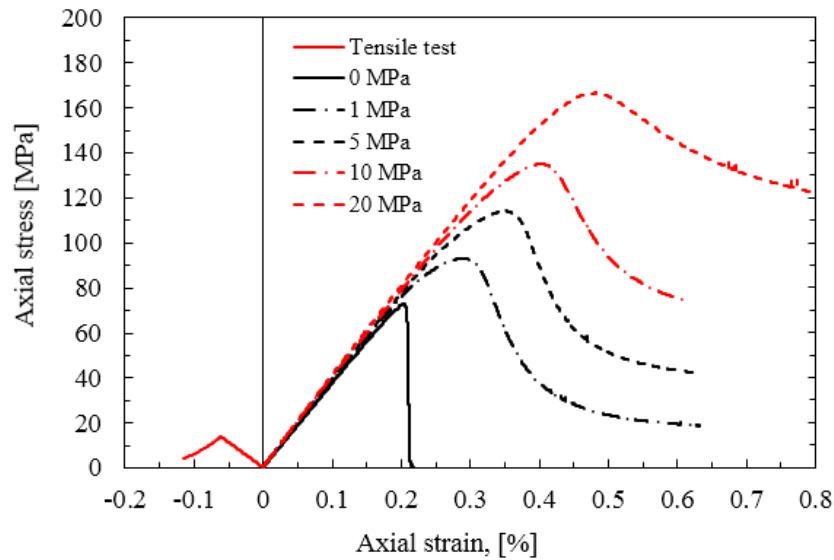


Fig. 3. Stress-strain curves of PFC3D simulation

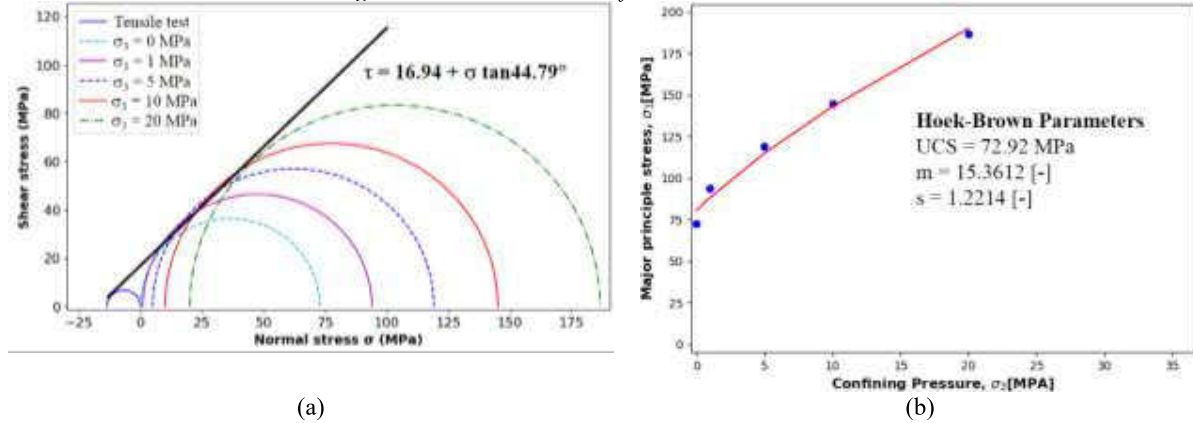


Fig. 4. Failure criteria of the intact rock: (a) – Mohr-Coulomb failure criterion, (b) – Hoek-Brown failure criterion.

4. Conclusions

The study applied the design of experiments (DOE) method to determine the microstructural parameters for the rock material simulation model using the Particle Flow Code (PFC) method. The research results demonstrated that the behavior of the rock model closely aligns with the behavior of the rock sample obtained from the laboratory experiments. The values of compressive strength, elastic modulus, and Poisson's ratio for the laboratory-tested rock samples and the modeled rock samples are 71.9 MPa (UCS), 36.7 GPa (E), 0.22 (ν) and 72.75 MPa (UCS), 35.94 GPa (E), 0.23 (ν), respectively.

From the rock model, the shear strength characteristics of the rock can be determined according to the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria. Additionally, the rock model can be used to study the complex behavior of rock masses in natural conditions.

References

- Cao, R., Cao, P., Lin, H., Ma, G., Fan, X., and Xiong, X., 2018. Mechanical behavior of an opening in a jointed rock-like specimen under uniaxial loading: experimental studies and particle mechanics approach. *Arch Civ Mech Eng*, 18: 198-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.06.010>
- Diambra, A., Festugato, L., Ibraim, E., da Silva, A.P., and Consoli, N., 2018. Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. *Soils and foundations*, 58(1): 199-211.
- Itasca, 2014. Itasca Consulting Group Inc. PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) (Version 5.0): Minneapolis, MN: ICG.

- Lin, Q., Cao, P., Meng, J., Cao, R., and Zhao, Z, 2020. Strength and failure characteristics of jointed rock mass with double circular holes under uniaxial compression: Insights from discrete element method modelling. *Theor Appl Fract Mech*, 109, 102692. doi:https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102692
- Ma, Y., and Huang, H, 2018. A displacement-softening contact model for discrete element modeling of quasi-brittle materials. *Int J Rock Mech Min Sci*, 104: 9-19.
- Plackett, R.L., and Burman, J.P, 1946. The design of optimum multifactorial experiments. *Biometrika*, 33(4): 305-325.
- Potyondy, D.O., and Cundall, P, 2004. A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 41(8): 1329-1364. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011
- Rodrigues, M.I., and Iemma, A.F, 2014. *Experimental design and process optimization*: CRC Press.
- Sagong, M., Park, D., Yoo, J., and Lee, J.S, 2011. Experimental and numerical analyses of an opening in a jointed rock mass under biaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci*, 48(7): 1055-1067. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.09.001
- Song, J.-J., Lee, C.-I., and Seto, M, 2001. Stability analysis of rock blocks around a tunnel using a statistical joint modeling technique. *Tunnelling and underground space technology*, 16(4): 341-351.
- Tawadrous, A., DeGagné, D., Pierce, M., and Mas Ivars, D, 2009. Prediction of uniaxial compression PFC3D model micro-properties using artificial neural networks. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 33(18): 1953-1962.
- Yang, S.-Q., Yin, P.-F., Zhang, Y.-C., Chen, M., Zhou, X.-P., Jing, H.-W., and Zhang, Q.-Y, 2019. Failure behavior and crack evolution mechanism of a non-persistent jointed rock mass containing a circular hole. *Int J Rock Mech Min Sci*, 114: 101-121. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.017
- Yang, X., Jing, H., and Chen, K, 2016. Numerical simulations of failure behavior around a circular opening in a non-persistently jointed rock mass under biaxial compression. *Int J Min Sci Technol*, 26(4): 729-738. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.05.027
- Yoon, J, 2007. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation. *Int J Rock Mech Min Sci*, 44(6): 871-889.

TÓM TẮT

Mô hình hoá ứng xử của đá nguyên khối bằng phương pháp phần tử dòng hạt (PFC)

Bùi Văn Bình^{1,2}

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

² Nhóm nghiên cứu Địa chất công trình và Địa môi trường

Phương pháp mô hình số để nghiên cứu ứng xử phức tạp của khối đá đã và đang được nhiều nhà khoa học áp dụng. Mô hình khối đá là sự kết hợp của hai mô hình cơ bản: mô hình đá nguyên khối và mô hình mô phỏng các đặc trưng của hệ thống khe nứt, mặt phân lớp và phân phiến. Trong phương pháp Phần tử dòng hạt (PFC), đá nguyên khối được mô phỏng bởi tập hợp các hạt cầu liên kết với nhau. Vì vậy, trên thực tế, việc xác định các thông số phản ánh các liên kết giữa các hạt là một vấn đề thách thức đối với các nhà nghiên cứu. Hiện tại, không có thí nghiệm cụ thể nào có thể hoàn toàn xác định được các thành phần phản ánh sự liên kết giữa các khoáng vật hoặc hạt đá. Phần lớn các liên kết giữa các hạt trong phương pháp PFC được xác định thông qua phương pháp thử và sai để đảm bảo rằng các đặc tính về độ bền, đặc điểm biến dạng và các kiểu phá hủy của mô hình gần giống với kết quả thí nghiệm trong phòng. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE) để xác định các thông số phản ánh các liên kết giữa các hạt để thuận lợi cho việc mô phỏng đá và khối đá bằng phương pháp PFC. Kết quả nghiên cứu cho thấy ứng xử của mô hình đá nhất quán với hành vi của mẫu đá trong các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Các giá trị của cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của mẫu đá thử nghiệm trong phòng thí nghiệm và mẫu đá mô hình lần lượt là 71,9 MPa (UCS), 36,7 GPa (E), 0,22 (ν) và 72,75 MPa (UCS), 35,94 GPa (E), 0,23 (ν). Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng phương pháp thiết kế thí nghiệm có thể được sử dụng hiệu quả để giúp các kỹ sư mô phỏng các tính chất của đá trong phương pháp PFC.

Từ khóa: phương pháp phần tử dòng hạt; mô hình số; đá nguyên khối.