

О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МОДЕЛЯМИ ХУКА-БРАУНА И МОРА-КУЛОНА ДЛЯ ГРУНТОВ НАСЫПНЫХ ПЛОТИН

Качаев А.Е., Турапин С.С., Гарголина К.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна, Россия

Ключевые слова: грунт, плотина, модель Хука-Брауна, модель Мора-Кулона, корреляция, сцепление, угол внутреннего трения.

Аннотация. В работе исследована корреляционная зависимость между моделями Хука-Брауна и Мора-Кулона в контексте грунтов насыпных плотин. Проведен теоретический анализ и сравнение методов, выявлены условия, при которых модели могут заменяться или дополнять друг друга для различных типов грунтов. Предложены практические рекомендации по их применению для повышения точности расчетов деформаций, сдвиговых пределов и устойчивости конструкций. Полученные результаты позволяют улучшить методики проектирования и эксплуатации насыпных плотин, обеспечивая более надежное прогнозирование поведения грунтов в сложных условиях. В статье также обсуждаются ограничения моделей и рекомендации по их комбинированному использованию в зависимости от характеристик грунтовых массивов.

ON THE CORRELATION BETWEEN THE HOOK-BROWN AND MOHR-COULOMB MODELS FOR BULK DAM SOILS

Kachaev A.E., Turapin S.S., Gargolina K.V.

*All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply
“Raduga”, Kolomna, Russia*

Keywords: soil, dam, Hooke-Brown model, Mohr-Coulomb model, correlation, cohesion, angle of internal friction.

Abstract. The paper examines the correlation between the Hook-Brown and Mohr-Coulomb models in the context of the soils of bulk dams. A theoretical analysis and comparison of methods have been carried out, and conditions have been identified under which models can be replaced or complemented for different types of soils. Practical recommendations on their application are proposed to improve the accuracy of calculations of deformations, shear limits and structural stability. The results obtained make it possible to improve the methods of designing and operating bulk dams, providing more reliable prediction of soil behavior in difficult conditions. The article also discusses the limitations of the models and recommendations for their combined use, depending on the characteristics of the soil masses.

Введение. Насыпные плотины основаны на строительных грунтах, обладающих сложной поведением при нагружении. Модели механического поведения грунтов, такие как упругая модель Хука-Брауна и пластическая модель Мора-Кулона, широко применяются для расчетов их деформаций и устойчивости [1, 2]. В условиях эксплуатации и проектирования возникает необходимость унификации их применения, а также оценки возможности использования одной модели вместо другой. Исследование связи между этими моделями – важный шаг к повышению точности и универсальности

инженерных решений для грунтов насыпных плотин, особенно при анализе грунтов различных типов [3].

Целью работы является установление количественной корреляционной зависимости между моделью Хука-Брауна и моделью Мора-Кулона при описании механических свойств грунтов, используемых в насыпных плотинах, а также разработка практических рекомендаций по их использованию для различных типов грунтов.

Методы исследования. Для разработки цели исследования используется теоретический анализ модели Хука-Брауна, которая описывает упругие деформации и поведение горных пород при различных уровнях напряжений [4]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(A \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + B \right)^\alpha,$$

где σ_1 – главное напряжение при разрушении, МПа; σ_3 – минимальное главное напряжение, МПа; σ_{ci} – одноосное сжимающее напряжение, МПа; A , B и α – эмпирические параметры.

Также анализируется модель Мора-Кулона, которая характеризует сдвиговое поведение слоев грунта [5]:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\varphi'),$$

где τ – касательное напряжение, МПа; c – сцепление, кПа; σ_n – нормальное напряжение, МПа; φ' – внутренний угол трения, град.

Для установления связи вводились предположения, что в пределах экстремальных условий [4]:

$$\sigma_{\max} = c + \sigma_n \cdot \tan(\varphi'),$$

упругая характеристика может служить базой для оценки пределов пластического сползания слоя грунта по другому менее пластичному слою. Для этого вводился коэффициент β , связывающий параметры моделей с модулем упругости E [5]:

$$E = \beta(c + \sigma_n \cdot \tan(\varphi')).$$

где β – эмпирический коэффициент, зависящий от типа грунта и условий нагружения.

На основе экспериментальных данных по различным грунтам, а также численных моделирований установлены значения α и β для глин, песков и суглинков из чего часто и возводятся насыпные плотины. Это позволило определить области применимости и слабые стороны модели Мора-Кулона [6].

Результаты и обсуждение. Для песков и слабых грунтов, из которых построены насыпные плотины, где преимущественно присутствуют упругие деформации, рекомендуется использовать модель Хука-Брауна. Для глин и суглинков, где возможны пластические деформации, рекомендуется применять модель Мора-Кулона.

В инженерных расчетах целесообразно использовать комбинированный подход с учетом коэффициентов корреляции, определяемых экспериментально.

В грунтах с высоким сцеплением c и внутренним углом трения $\varphi > 20^\circ$, модель Мора-Кулона дает более точное описание предельных условий сдвига, а модель Хука-Брауна – приближение для начальной стадии деформаций.

В песках и рыхлых грунтах (низкое значение c , $\varphi < 20^\circ$), упругая модель может быть использована для кратковременных расчетов до достижения критических условий. При переходе от упругого к пластическому режиму параметры моделей грунтов связаны через эмпирическую формулу:

$$\sigma_{cr} = \beta \cdot E,$$

где σ_{cr} – критическое напряжение сдвига, МПа.

Практические рекомендации по применению рассматриваемых моделей грунтов:

1. Для оценки начальных деформаций грунтов насыпных плотин предпочтительно использовать модель Хука-Брауна.

2. Для оценки пределов стабильности и пластических сдвигов — модель Мора-Кулона.

3. Для комплексных расчетов рекомендуется обусловить параметры обеих моделей через установленные соотношения и коэффициенты корреляции.

Выводы. Исследование показало, что существует значимая корреляция между моделями Хука-Брауна и Мора-Кулона для грунтов, применяемых в насыпных плотинах. Их совместное использование позволяет повысить точность прогнозов деформационного и сдвигового поведения грунтов. Рекомендуется учитывать тип грунта и этап анализа при выборе модели, что способствует надежности принятия проектных решений.

Список литературы

1. Качаев А.Е., Турапин С.С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. – 2024. – №3. – С. 1-5. – doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
2. Burman A.A., Acharya S.P., Sahay R.R. Comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method // Asian journal of civil engineering (BHRC). 2015, vol. 16, no. 4, pp. 467-492.
3. Ghorbani A., Sadeghi M., Tuller M., Durner W., Jones S. B. A generalized van Genuchten model for unsaturated soil hydraulic conductivity // Vadose Zone Journal. 2024, vol. 23, p. 20369. doi.org/10.1002/vzj2.20369.
4. Сидоренко Д.А., Качаев А.Е. ВМ-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракеты многоцелевой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12-14 апреля 2023 года. – Рязань: Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2023. – С. 490-492.
5. Сенников М.Н., Сагин Ж., Толкынбаев Т.Т., Омарова Г.Е., Колбачева Ж.Е., Рсалиева А.А. Мониторинг безопасности гидротехнических сооружений с использованием ГИС // Механика и технологии. – 2022. – №4(78). – С. 105-112. – doi.org/ 10.55956/ETYJ1363.

6. Качаев А.Е., Турапин С.С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. – 2024. – №4. – С. 4-13. – doi.org/10.35688/2413-8452-2024-04-001.
7. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.

References

1. Kachaev A.E., Turapin S.S. Justification of the Need to Develop Integrated Computational Models of Earth Dams in Land Reclamation Systems // Science and the World. 2024, no. 3, pp. 1-5. doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
2. Burman A.A., Acharya S.P., Sahay R.R. Comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method // Asian journal of civil engineering (BHRC). 2015, vol. 16, no. 4, pp. 467-492.
3. Ghorbani A., Sadeghi M., Tuller M., Durner W., Jones S. B. A generalized van Genuchten model for unsaturated soil hydraulic conductivity // Vadose Zone Journal. 2024, vol. 23, p. 20369. doi.org/10.1002/vzj2.20369.
4. Sidorenko D.A., Kachaev A.E. BIM technologies in construction: what's next? // New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XXI International scientific and technical conference dedicated to the 35th anniversary of the flight of the orbital rocket plane of the reusable transport space system "Buran", Ryazan, April 12-14, 2023. – Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2023. – P. 490-492.
5. Sennikov M.N., Sagin Zh., Tolkyimbaev T.T., Omarova G.E., Kolbachaeva Zh.E., Rsalieva A.A. Monitoring the safety of hydraulic structures using GIS // Mechanics and Technology. 2022, no. 4(78), pp. 105-112. doi.org/10.55956/ETYJ1363.
6. Kachaev A.E., Turapin S.S. Methodology for numerical modeling of the stability of an earth dam during emergency drawdown of a reservoir // Ecology and Construction. 2024, no. 4, pp. 4-13. doi.org/10.35688/2413-8452-2024-04-001.
7. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, senior researcher of the Department of operation of irrigation and hydraulic engineering structures
Турапин Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, врио директора	Turapin Sergey Sergeevich – candidate of technical sciences, leading researcher, acting director
Карголина Кристина Витальевна – инженер-исследователь отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Kargolina Kristina Vitalievna – research engineer of the Department of operation of irrigation and hydraulic structures
doctor_cement@mail.ru	

Received 03.12.2025