

МЕТОД МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОТКОСА ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ О ВЫЗВАННЫХ ДОЖДЯМИ НЕГЛУБОКИХ ОПОЛЗНЯХ

КОИДЗУМИ К.

Высшая инженерная школа Осацкого университета, г. Суйта, префектура Осака, Япония
koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

ОДА К.

Инженерный факультет Осацкого университета Сангё, г. Дайто, префектура Осака, Япония

КОАЦУ М.

Высшая школа наук об окружающей среде и жизнедеятельности Университета Окаямы, г. Окаяма, префектура Окаяма, Япония

ИТО С.

Высшая школа науки и техники Кагосимского университета, г. Кагосима, префектура Кагосима, Япония

ЦУЦУМИ Х.

Компания West Nippon Expressway Company Limited, г. Ибараки, префектура Осака, Япония

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей сокращенный адаптированный перевод доклада японских исследователей К. Коидзуми и др. «Метод мониторинга состояния откоса для предупреждения о вызванных дождями неглубоких оползнях» (Koizumi et al., 2019), сделанного в 2019 году на 7-й Международной конференции Евразийского форума по гражданскому строительству. Этот доклад также был опубликован в виде статьи в журнале *Materials Science and Engineering* («Материаловедение и инженерия») издательством британской научной благотворительной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей оаистине международной. Данная работа находится на официальном сайте IOP в открытом доступе по лицензии Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0), которая позволяет распространять, микшировать, адаптировать, переводить и использовать публикации, даже в коммерческих целях, при условии ссылки на первоисточники. В нашем случае полная ссылка на источник для перевода (Koizumi et al., 2019) приведена в конце.

Мониторинг состояния откоса на предмет защиты от вызванных дождями неглубоких оползней стал важной проблемой в Японии в связи с недавними случаями экстремальных погодных условий. В частности, хорошо известно, что раннее выявление возможности внезапного схода неглубокого оползня, вызванного атмосферными осадками, является относительно трудным по сравнению с обнаружением медленно движущегося оползня.

Местные органы власти или компании по управлению гражданскими объектами заранее предупреждают жителей или пользователей о возможности стихийного бедствия на основе данных об осадках. Однако прогнозов о дождях недостаточно для выводов о рисках стихийных бедствий на отдельных откосах или склонах, поскольку такие прогнозы напрямую не отражают состояние грунтов в отношении содержания в них воды. Для решения этой проблемы авторы переведенной статьи предложили использовать показатель iQS, как раз и отражающий состояние грунта в отношении его объемной влажности.

Практическая применимость показателя iQS оценивалась с использованием результатов измерений, полученных при мониторинге реального откоса насыпи автомагистрали во время сильных дождей.

Было замечено, что результаты полевого мониторинга и прошлых лабораторных экспериментов хорошо согласуются между собой. Был сделан вывод, что деформирование откоса вследствие повышения в нем уровня воды не начнет происходить до тех пор, пока измеренное (реальное) объемное содержание воды в грунте VWC не превысит

значение квазинасыщенного объемного содержания воды (максимальной объемной влажности грунта при постоянной интенсивности дождя в неводонасыщенных условиях), обозначаемого как IQS.

По мнению авторов переведенной статьи, показатель $iQS = VWC/IQS$ может быть использован для раннего предупреждения о рисках схода неглубоких оползней.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

откос автомагистрали; атмосферные осадки; грунт; объемная влажность; неглубокие оползни; полевой мониторинг; раннее прогнозирование; раннее предупреждение

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Коидзуми К., Ода К., Комацу М., Ито С., Цуцуми Х. Метод мониторинга состояния откоса для предупреждений о вызванных дождями неглубоких оползнях // Геоинфо. 2023. № 6. С. 58–64 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-6-58-64

SLOPE STRUCTURAL HEALTH MONITORING METHOD AGAINST RAINFALL-INDUCED SHALLOW LANDSLIDE

K. KOIZUMI

Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka, Japan
koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

K. ODA

Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University, Daito, Osaka, Japan

M. KOMATSU

Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University, Kitaku Okayama, Okayama, Japan

S. ITO

Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Kagoshima, Japan

H. TSUTSUMI

West Nippon Expressway Company Limited, Ibaraki, Osaka, Japan

ABSTRACT

We bring to the attention of the readers an slightly abridged and adapted translation of the report “Slope structural health monitoring method against rainfall-induced shallow landslide” by Japanese researchers (Koizumi et al., 2019), made in 2019 at the 7th International Conference of Euro-Asia Civil Engineering Forum. That report was also published as an article in the “Materials Science and Engineering” journal by the Publisher of the Institute of Physics (IOP), a British scientific charity organization that has become truly international. This is an open access paper in the official IOP website. It is distributed under the Creative Commons Attribution 3.0 license (CC BY 3.0), which allows you to distribute, mix, adapt, translate and use publications, even for commercial purposes, provided that the original sources are cited. In our case, the full reference to the source for the translation (Koizumi et al., 2019) is given in the end.

The structural health monitoring of a slope against rainfall-induced shallow landslides has become an important issue in Japan with the recent instances of extreme weather. In particular, the early detection of a sudden rainfall-induced shallow landslide is well known to be relatively difficult compared with that of a slow-moving landslide. Thus, local governments or civil-structure management companies provide residents or users with early warning information of a disaster via rainfall-based data. However, rainfall information is not enough to predict the risk of individual slope disasters because it does not directly reflect the soil-moisture condition of a slope. To solve this problem, a soil moisture-based index (iQS) is proposed. The applicability of iQS in a real slope was evaluated using the result obtained by monitoring a real slope during heavy rainfall along an expressway. The monitoring results of the real slope were seen to agree well with the results of past laboratory experiments. This implies that slope deformation owing to the rise in water level does not occur unless the volumetric water content exceeds the value of the quasi-saturated volumetric water content (the maximum volumetric soil moisture at constant rain intensity in non-saturated conditions denoted as IQS) of the real slope. Based on this result, iQS can be used for predicting the risk of shallow landslides at an early stage.

KEYWORDS:

expressway slope; precipitation; soil; volume water content; shallow landslides; field monitoring; early forecasting; early warning.

FOR CITATION:

Koizumi K, Oda K., Komatsu M., Ito S., Tsutsumi H. Metod monitoringa sostoyaniya otkosa dlya preduprezhdeniy o vyzvannyh dozhdymi neglubokih opolznyah [Slope structural health monitoring method against rainfall-induced shallow landslide] // Geoinfo. 2023. № 6. S. 58–64 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-6-58-64 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Возникновение вызванных дождями неглубоких оползней в Японии участилось из-за недавних экстремальных погодных условий. В частности, известно, что раннее выявление возможности внезапного схода неглубокого оползня, вызванного атмосферными осадками, является относительно трудным по сравнению с обнаружением типичного (более медленного) поведения оползня.

Пытаясь решить эту проблему, каждый местный орган власти по электронной почте и через веб-сайты заранее предупреждает жителей о возможности такого стихийного бедствия на основе данных Японской метеорологической радиолокационной системы и автоматизированной системы сбора метеорологических данных. Однако информации об осадках недостаточно для прогнозирования риска стихийных бедствий для отдельных откосов или склонов, находящихся рядом с жилыми районами.

Что касается гражданской инфраструктуры, японские компании, управляющие эксплуатацией автомагистралей, имеют свои собственные стандарты регулирования в отношении возможности возникновения оползней, вызванных осадками, на основе исторических данных о дождях. Однако иногда суждения о риске схода неглубоких оползней являются неточными, поскольку информация об осадках непосредственно не отражает состояние слагающего откосы или склоны грунта в отношении его влажности.

В предыдущих исследованиях были предложены формула для прогноза и метод графического решения для определения времени разрушения откоса или склона в соответствии с зависимостью между установившейся скоростью деформирования и временем разрушения при ползучести [1, 2]. Эта взаимосвязь была оценена и верифицирована на нескольких участках [1, 3, 4]. Однако указанный метод позволяет предсказать возможность возникновения оползня в течение нескольких дней и поэтому не подходит для прогноза разрушения откоса или склона, которое произойдет из-за проливных дождей через короткий период времени.

Учимура и др. [5] предложили метод прогнозирования разрушения откоса или склона во время сильного дождя с помощью установленного там инклинометра и определения изменений угла наклона. Но местным органам власти и японским компаниям, управляющим эксплуатацией автомагистралей, требу-

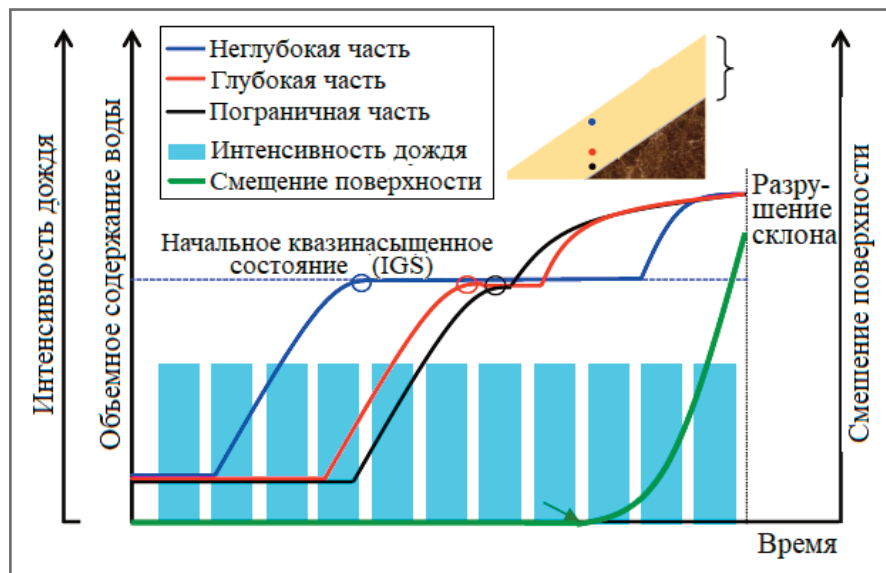


Рис. 1. Процесс, ведущий к сходу неглубокого оползня

ется достаточное количество времени, чтобы объявить об эвакуации и закрытии той или иной дороги.

Для решения вышеупомянутых проблем в настоящей статье для мониторинга состояния откоса и предсказания возможности быстрого схода вызванного дождем неглубокого оползня предлагается использовать показатель состояния грунта по его влажности *iQS*, который основан на экспериментах на модели откоса. В этом исследовании применимость *iQS* на практике оценивалась с использованием результатов мониторинга реального откоса насыпи одной из автомагистралей Японии во время сильных дождей.

БАЗОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАННЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕГЛУБОКИХ ОПОЛЗНЕЙ ►

Авторы уточнили взаимосвязь между объемным содержанием воды (объемной влажностью) на разной глубине и смещением (деформацией сдвига) на основе результатов прошлых исследований, полученных с использованием экспериментов на модельном откосе, как показано на рисунке 1 [6, 7]. Когда происходит инфильтрация дождевой воды в модельный откос, сначала начинает увеличиваться объемная влажность в его неглубокой части (см. синюю точку на рисунке 1), а затем она начинает расти в двух точках (красной и черной на рисунке 1) более глубокой части – непосредственно над подошвой поверхностного слоя, причем от красной точки к черной. Затем данные участки достигают квазинасыщенного водой состояния. В этих условиях гидравлическая проводимость

(водопроницаемость) при ненасыщенном состоянии теоретически уравнивается интенсивностью дождевых осадков, если только их интенсивность не превышает гидравлическую проводимость при насыщенном состоянии. Это указывает на то, что воздух все еще присутствует в порах грунта. В дальнейшем, если происходит постоянная инфильтрация дождевой воды в откос, в более глубокой части (над подошвой верхнего слоя грунта) образуется слой воды и ее объемное содержание снова начинает увеличиваться начиная с этой границы кверху. Это означает, что с повышением уровня воды воздух в порах грунта замещается поровой водой и ее объемное содержание снова увеличивается от этой пограничной части к менее глубокой. Затем происходит неглубокий оползень, вызванный уменьшением эффективного напряжения из-за порового давления воды.

Коидзуми и др. [6] определили начальное квазинасыщенное объемное содержание воды (*iQS*) как состояние, при котором инфильтрация и дренаж вблизи датчика уравниваются в процессе инфильтрации осадков. Поскольку деформирование не происходит до тех пор, пока не будет превышено значение квазинасыщенного объемного содержания воды *iQS*, Коидзуми и др. [6] указали, что мониторинг структурного состояния откоса во время дождя возможен с использованием *iQS* в качестве нормативного показателя.

В случае реального откоса интенсивность дождя непостоянна. Поэтому ожидается, что квазинасыщенное объемное содержание воды также колеблет-

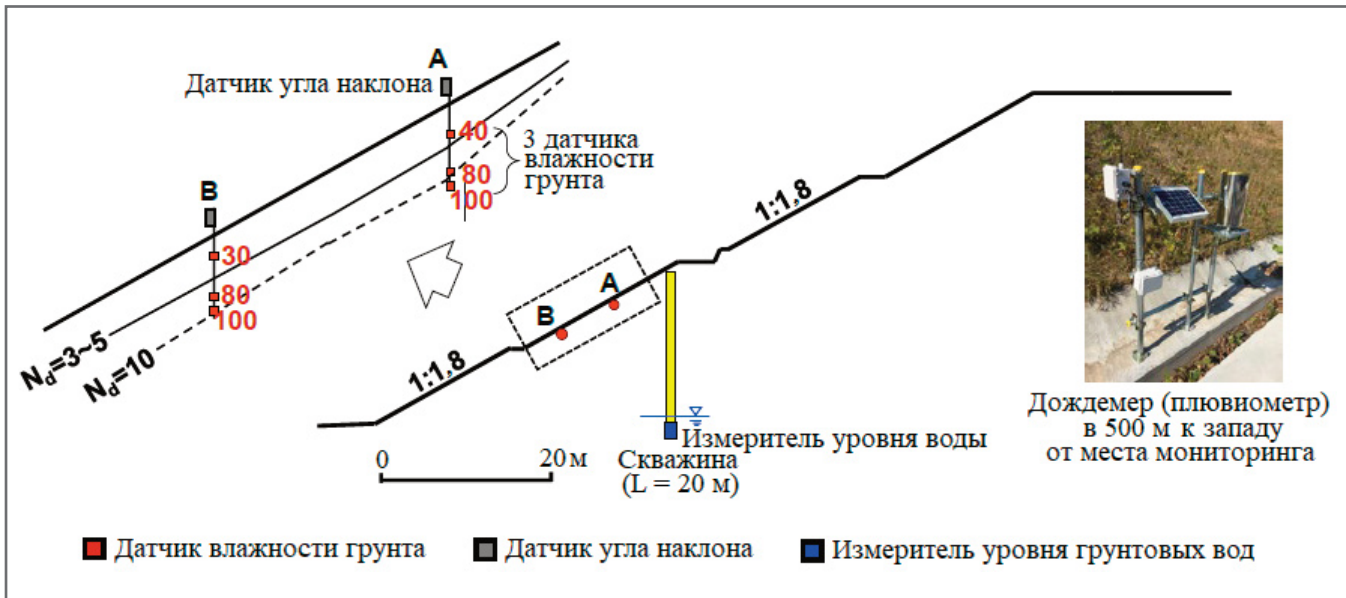


Рис. 2. Расположение датчиков для мониторинга откоса автомагистрали

ся в соответствии с изменениями интенсивности дождевых осадков. Эта связь может быть выражена следующим соотношением между интенсивностью дождя и ненасыщенной гидравлической проводимостью [8]:

$$RI \approx k_{IQS}, \quad (1)$$

где RI (мм/ч) – интенсивность дождя; k_{IQS} (мм/ч) – ненасыщенная гидравлическая проводимость, когда объемное содержание воды достигает величины IQS и становится постоянным.

Параметр IQS показывает максимальное объемное содержание воды при постоянной интенсивности дождевых осадков в неводонасыщенных условиях и может быть объяснен через взаимосвязь между ненасыщенной гидравлической проводимостью и объемным содержанием воды. Рассматривая в качестве примера модель Ван Генухтена – Муалема (van Genuchten – Mualem, VG), связь между k_{IQS} и IQS можно выразить так:

$$k_{IQS} = k_s \times \left\{ \frac{(IQS - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right\}^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - \left\{ \frac{(IQS - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right\}^{\frac{n}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}^2, \quad (2)$$

где k_s (мм/ч) – гидравлическая проводимость при водонасыщенном состоянии; n – параметр, задающий форму характеристической кривой для воды; θ – наблюдаемое объемное содержание воды; θ_r – остаточное объемное содержание воды; θ_s – объемное содержание воды при насыщенном состоянии.

Согласно уравнениям (1) и (2) взаимосвязь между интенсивностью дождя

и IQS может быть выражена следующим образом:

$$RI = k_s \times \left\{ \frac{(IQS - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right\}^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - \left\{ \frac{(IQS - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \right\}^{\frac{n}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}^2. \quad (3)$$

Однако максимальное значение k_{IQS} равно k_s , а условие, удовлетворяющее уравнению (3), – это $RI \leq k_s$. Если RI превышает k_s , то значение IQS теоретически становится постоянным при насыщенном объемном содержании воды. Хотя и можно оценить взаимосвязь между интенсивностью дождя и IQS, если получен каждый параметр для уравнения (3), точность оценки каждого параметра в точке наблюдений не гарантирована.

Для решения этой проблемы авторы настоящей статьи предлагают метод простой оценки взаимосвязи между интенсивностью дождя и IQS на основе данных полевого мониторинга.

МОНИТОРИНГ РЕАЛЬНОГО ОТКОСА НАСЫПИ АВТОМАГИСТРАЛИ ▶

Схема мониторинга откоса ▶

Местом мониторинга был откос насыпи одной из автомагистралей Японии. Материалом насыпи был разрушенный гранитный грунт. На рисунке 2 показано расположение датчиков, установленных для мониторинга.

Чтобы оценить состояние откоса в отношении инфильтрации в него дождевых осадков, были установлены датчики для измерения влажности грунта и угла наклона, а также измеритель

уровня грунтовых вод и дождемер (плювиометр). Датчики влажности грунта были размещены на каждом из трех типов глубины на основе рассмотренной ранее концепции и результатов динамического зондирования (стандартных пенетрационных испытаний – SPT). В каждой точке мониторинга вместе с датчиками влажности грунта был установлен датчик угла наклона для обнаружения деформаций откоса. Измеритель уровня грунтовых вод был размещен в скважине, а дождемер – на срезанном склоне в 500 м к западу от места мониторинга.

Мониторинг был начат в ноябре 2017 года. Его данные отправлялись на веб-сервер каждые 10 минут через «интернет вещей» (компьютерную сеть, объединяющую все используемые при мониторинге устройства) с использованием технологии беспроводной сенсорной сети, как показано на рисунке 3. Сенсорные узлы, которые работали от солнечного источника электропитания, могли взаимодействовать друг с другом через беспроводную сенсорную сеть в прерывистом режиме. В представленном в данной статье исследовании авторы проанализировали результаты мониторинга в точке А (см. рис. 2) во время сильных дождей в июле 2018 года.

Полученные результаты и их обсуждение ▶

На рисунке 4 показаны изменения во времени объемной влажности грунта, угла наклона, уровня грунтовых вод и интенсивности осадков в точке мониторинга А в период сильных дождей в июле 2018 года. Из рисунка видно, что,

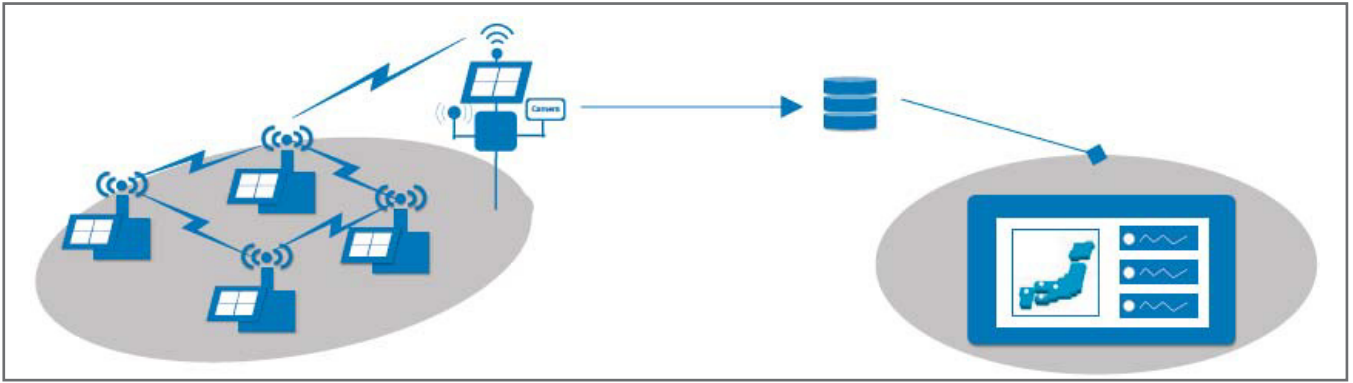


Рис. 3. Используемая система мониторинга состояния откоса

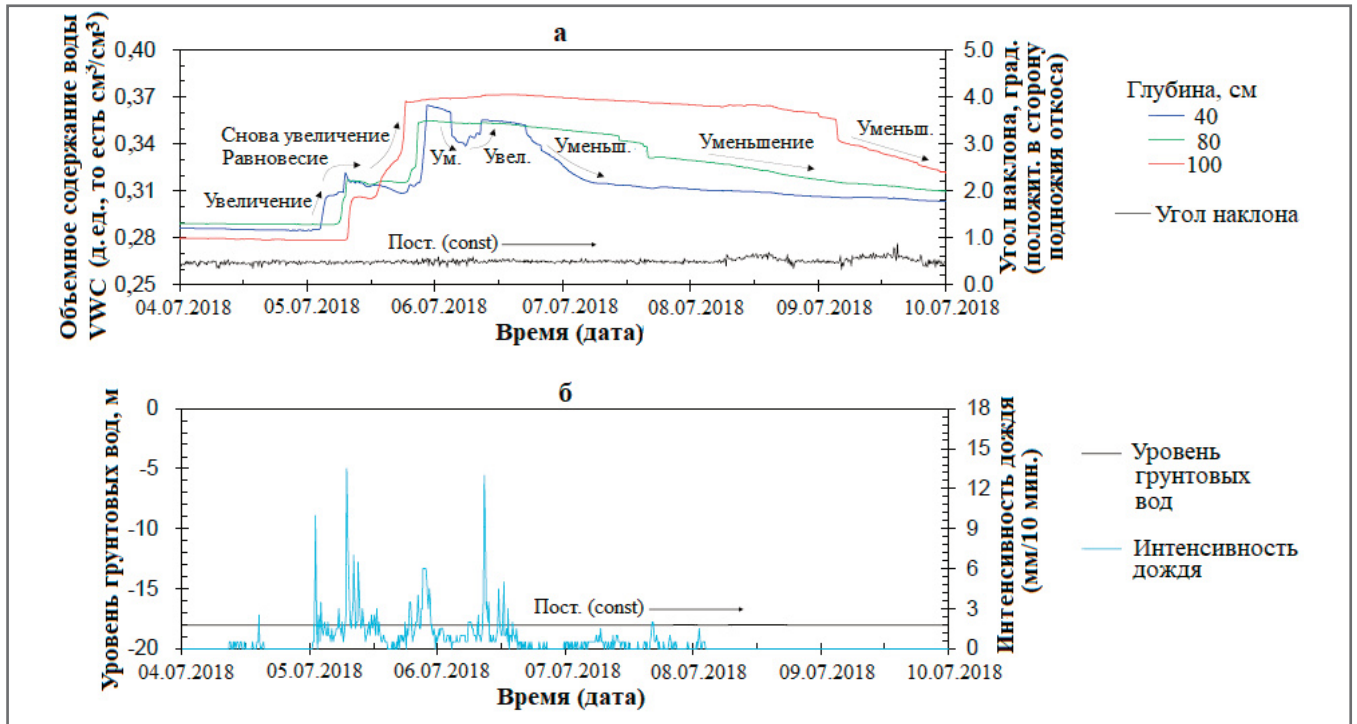


Рис. 4. Изменения во времени параметров мониторинга в точке А в период сильных дождей

хотя объемное содержание воды и растет с увеличением интенсивности дождя и инфильтрации осадков на каждой глубине (причем сначала на глубине 40 см, потом на глубине 80 см и потом на глубине 100 см), но в какой-то момент этот рост временно замедляется и достигается равновесное состояние. Точки этих изменений соответствуют величинам IQS для каждого датчика (см. рис. 1). И понятно, что объемное содержание воды на каждой глубине в этих точках достигает квазинасыщенного состояния. Другими словами, было подтверждено, что результаты мониторинга реального откоса хорошо согласуются с показанным на рисунке 1 (то есть с рассмотренной ранее концепцией).

Затем с очередным увеличением интенсивности дождя объемная влажность грунта снова стала расти на каждой глубине, причем на этот раз сначала на глу-

бине 100 см, потом на глубине 80 см и потом на глубине 40 см. Это указывает на формирование временного уровня воды, отличного от уровня грунтовых вод, в глубокой части (то есть слоя воды над подошвой верхнего слоя грунта, причем с увеличением толщины этого слоя при росте объемной влажности на каждой глубине). Это свидетельствует об увеличении риска деформации откоса, поскольку по мере повышения порового давления воды происходит постепенная потеря эффективной прочности грунта на сдвиг. При этом следует отметить, что не наблюдалось практически никаких изменений угла наклона в точке А (см. рис. 4, а) благодаря выполненному в свое время армированию насыпи. Уровень грунтовых вод также оставался постоянным (см. рис. 4, б) благодаря созданной в свое время в насыпи системе подземного дренажа.

Метод оценки IQS с использованием данных полевого мониторинга

На рисунке 5, а представлены концептуальные диаграммы, показывающие связь между квазинасыщенным объемным содержанием воды IQS (то есть максимальной влажностью грунта при постоянной интенсивности дождя в неводонасыщенных условиях) и интенсивностью дождя RI. Если сопоставить рисунки 5, а и 5, б, то видна связь между максимальным значением объемной влажности грунта и связанной с ним максимальной интенсивностью атмосферных осадков для того или иного периода затяжных дождей. Теоретическая связь между IQS и RI на основе рассмотренной ранее модели Ван Генухтена – Муалема (van Genuchten – Mualem, VG) представлена на рисунке 5, а сплошной черной линией.

Штриховыми линиями показана эта связь на основе данных мониторинга до (черная штриховая линия) и после (синяя штриховая линия) уточнения на основе большего количества результатов мониторинга и данных о сильных дождях. Видно, что после уточнения связь «IQS – RI» становится гораздо ближе к теоретической сплошной черной линии.

На рисунке 6 показана связь между объемным содержанием воды на небольшой глубине (40 см) и максимальной интенсивностью дождя для каждого периода выпадения осадков с ноября 2017 года по август 2018 года.

Зависимость между IQS и RI в точке А приблизительно выражается следующим уравнением, в котором используется линия, ограничивающая группу точек, представленных на рисунке 6:

$$IQS = 0,00015 \cdot RI + 0,297. \quad (4)$$

Предложение норматива на основе показателя iQS

Для раннего прогнозирования риска схода неглубокого оползня авторами настоящей статьи предлагается использовать показатель iQS на основе приведенных выше результатов исследований. Показатель iQS является безразмерным и получается путем деления измеренного объемного содержания воды VWC на квазинасыщенное объемное содержание воды IQS (то есть на максимальную объемную влажность грунта при постоянной интенсивности дождя в неводонасыщенных условиях), соответствующее интенсивности дождя:

$$iQS = \frac{VWC}{IQS}. \quad (5)$$

При iQS=1,0 объемное содержание воды достигает квазинасыщенного состояния. А при iQS>1 на подошве верхнего слоя грунта образуется слой воды. При этом объемная влажность начинает увеличиваться от этой границы вверх и достигает насыщенного состояния сначала на большей глубине, а потом на все меньшей.

На рисунке 7 показаны изменения объемной влажности на каждой глубине и показатель iQS на глубине 40 см. Видно, что время, когда iQS достигает 1,0, совпадает со временем, когда VWC временно уравнивается. Также видно, что только по значению VWC нелегко судить о том, достигло ли объемное содержание воды квазинасыщенного со-

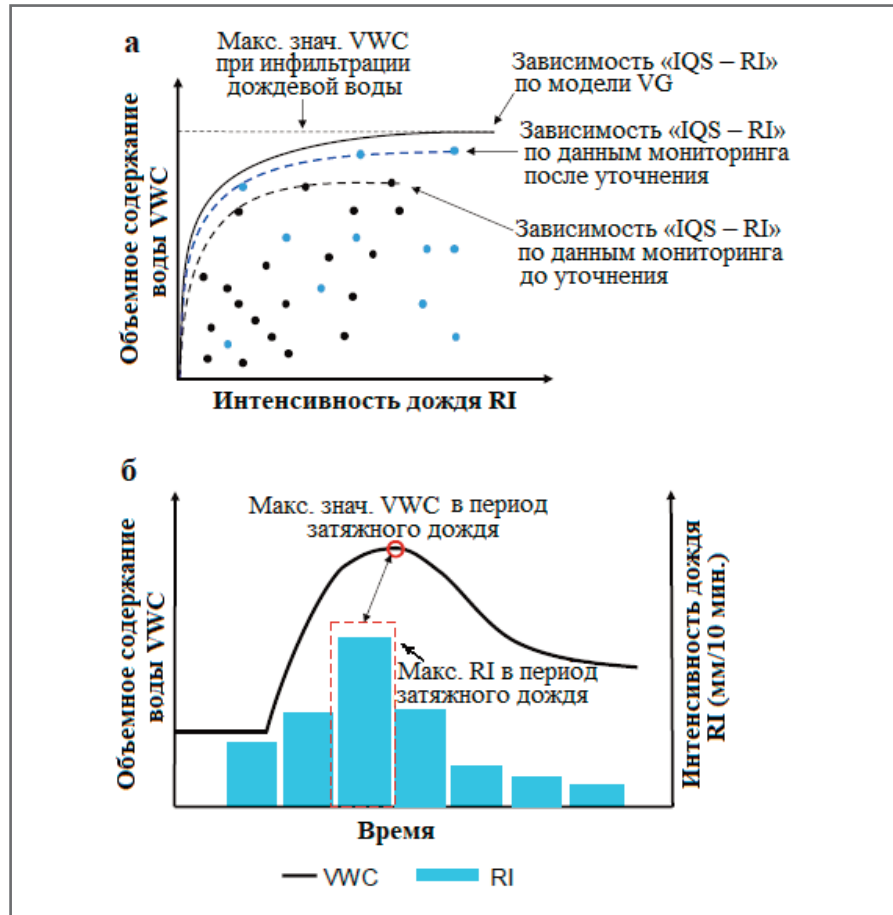


Рис. 5. Концептуальные диаграммы, показывающие взаимосвязь между квазинасыщенным объемным содержанием воды IQS и интенсивностью дождя RI (а), а также более подробная информация к этому рисунку (б)

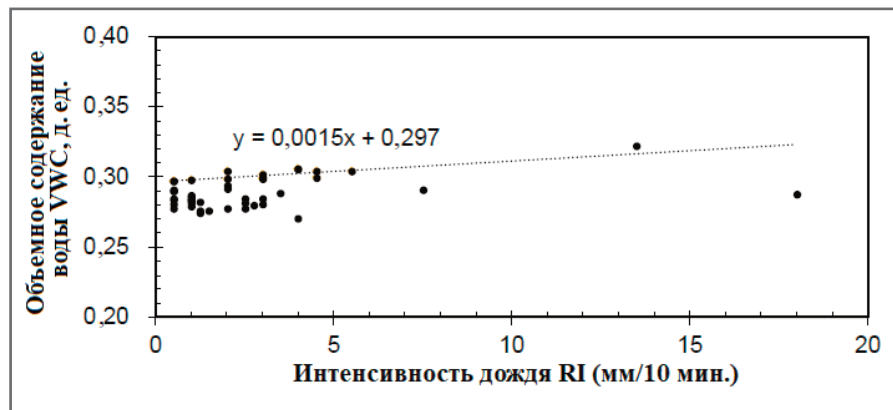


Рис. 6. Связь между объемным содержанием воды на небольшой глубине (40 см) и максимальной интенсивностью дождя для каждого периода выпадения осадков с ноября 2017 года по август 2018 года

стояния в режиме реального времени. А вот использование показателя iQS позволяет судить о том, достигнуто ли квазинасыщенное состояние. Другими словами, с помощью iQS можно осуществлять раннее предупреждение местных органов власти и инфраструктурных компаний о рисках возникновения неглубоких оползней с достаточным временем для эвакуации и закрытия дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг состояния склонов или откосов на предмет неглубоких оползней, вызванных дождями, стал важной проблемой в Японии в связи с недавним увеличением количества и интенсивности экстремальных погодных условий. Для решения этой проблемы в данной статье был предложен показатель iQS, основанный на влажности грунта, и оценена его применимость на практике с по-

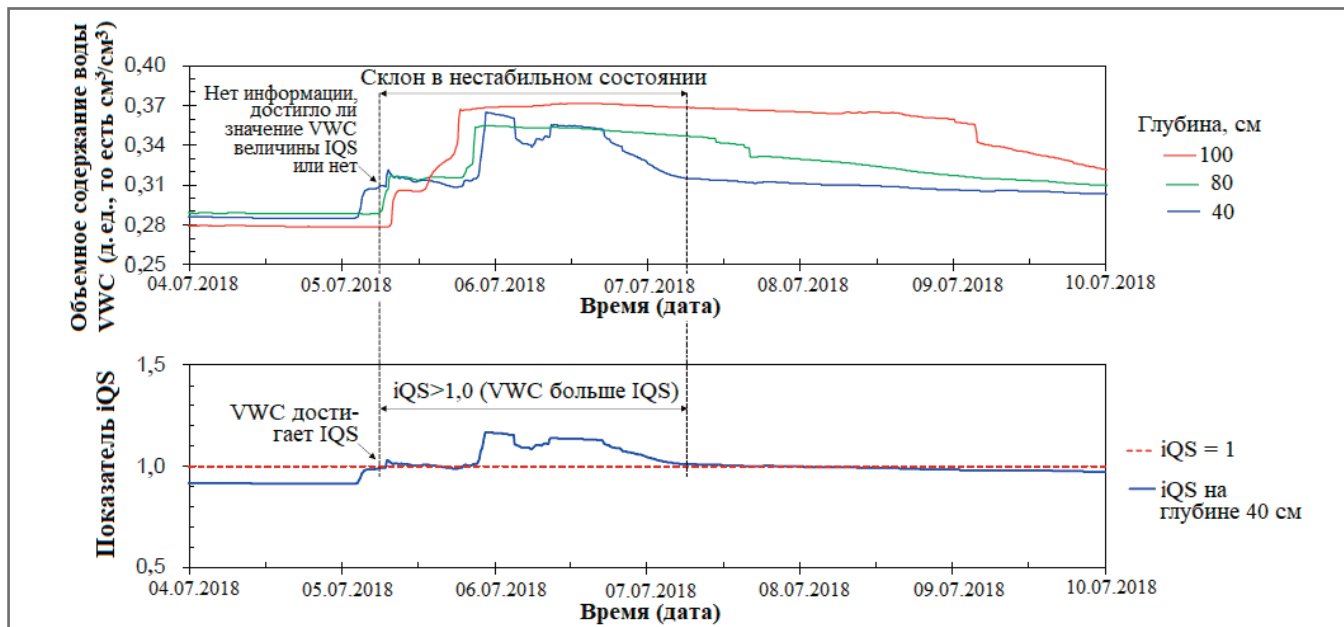


Рис. 7. Связь между показателем iQS и данными мониторинга

мощью результатов мониторинга реального откоса насыпи одной из автомагистралей Японии во время сильных дождей.

Была разработана система мониторинга откосов автомагистралей в режиме реального времени с использованием технологии «интернета вещей» (компьютерной сети, объединяющей все используемые при мониторинге устройства) с использованием беспроводной сенсорной сети.

Авторы статьи предложили метод простой оценки связи между интенсивностью дождя и IQS на основе данных полевого мониторинга.

Кроме того, авторы предложили показатель iQS для раннего прогнозирования риска схода неглубокого оползня.

Результаты мониторинга реального откоса хорошо согласовывались с результатами предыдущих лабораторных экспериментов. Это позволило сделать вывод о том, что деформирование реального откоса за счет повышения уровня воды не происходит, пока измеренная объемная влажность грунта VWC не превысит квазисыщенное объемное содержание воды IQS (то есть максимальную объемную влажность грунта при постоянной интенсивности

дождя в неводонасыщенных условиях) для этого откоса, то есть пока показатель $iQS = VWC / IQS$ не станет больше единицы. ▣

Авторы хотели бы поблагодарить Т. Ямамото (T. Yamamoto) за техническую помощь в проведении полевых работ и экспериментов. Это исследование было частично поддержано грантом на проведение научных исследований 17K00615, за предоставление которого авторы также выражают благодарность

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА (SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Koizumi K., Oda K., Komatsu M., Ito S., Tsutsumi H. Slope structural health monitoring method against rainfall-induced shallow landslide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 615. Proceedings of the 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum (30.09.2019 – 2.10.2019). Article 012046. doi:10.1088/1757-899X/615/1/012046. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/615/1/012046.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ (THE REFERENCES LISTED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Saito M., Uesawa H., Prediction of slope failure period // Landslides. 1966. Vol. 2. № 2. P. 7–12.
2. Saito M. Prediction of slope failure due to the third creep // Landslides. 1988. Vol. 4. № 3. P. 1–8.
3. Yamada T., Kobashi S., Kusano K. Collapse of Takabayama Tunnel caused by landslide // Landslides. 1971. Vol. 8. № 1. P. 11–24.
4. Watari R., Takebayashi S., Matsuda R. Characteristics of landslide by cut of a slope for dam construction materials along the Managawa River // Landslides. 1977. Vol. 13. № 4. P. 1–10.
5. Uchimura T., Towhata I., Wang L., Nishie S., Yamaguchi H., Seko I., Qiao J. Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55. № 5. P. 1086–1099.
6. Koizumi K., Sakuradani K., Oda K., Ito S., Fukuda Y., Feng Q., Takemoto M. Fundamental research on advancement of regulation standard for expressway management against rainfall-induced surface failure // J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. C (Geosphere Engineering). 2017. Vol. 73. № 1. P. 93–105.
7. Koizumi K., Sakuradani K., Oda K., Komatsu M., Ito S. Relationship between initial quasisaturated volumetric water content and rainfall-induced slope deformation based on a model slope experiment // J. GeoEng. 2018. Vol. 13. № 4. P. 179–187.
8. Yamamoto T., Koizumi K., Sakuradani K., Komatsu M., Ito S., Oda K. A consideration on relationship between initial quasi-saturated volumetric water content and rain intensity based on field measurement result // Proc. Kansai Geo-Symp. 2018. P. 187–190.