# РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ МОСТОВ С ГЕОМАССИВАМИ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ И НАСЫПЕЙ

При строительстве моста через овраг с водотоком при реконструкции автодороги М-4 «Дон» (*рис. 1*) произошли подвижки обоих устоев. Первые смещения конструкций верха опоры строящегося моста были отмечены в январе 2009 г. – после отсыпки концевых участков подходных насыпей. В результате смещения закрылись зазоры между торцами пролетных строений и шкафными стенками. Геодезическая сьемка показала наличие как горизонтальных, так и вертикальных смещений насадок крайних опор. Последние, замеренные в апреле 2009 г. величины смещений достигли 80 мм. Наличие горизонтальных смещений, наряду с вертикальными, свидетельствует о возможности сползания насыпного грунта по откосу оврага. В связи с этим работы были прекращены до принятия соответствующего решения.

Перед филиалом ОАО ЦНИИС «НИЦ «Мосты» была поставлена задача выполнить расчеты аварийного моста через овраг при реконструкции автодороги М-4 «Дон» и разработать конструктивно-технологические мероприятия по стабилизации устоев и насыпей. В естественном состоянии склоны оврага находились в стабильном состоянии. При активных техногенных воздействиях, каковыми является загружение склонов высокими насыпями (10-12 м), отсыпкой нефильтрующих или очень плохо фильтрующих грунтов, коэффициент уплотнения которых ниже требуемого нормами, могли развиваться оползневые давления. Как показали расчеты, потенциальной поверхностью скольжения является контактная поверхность коренных грунтов склона и насыпных грунтов.

Для достоверности расчетов устоев моста они были выполнены тремя методами:

- методом алгебраического суммирования;
- методом Г.М. Шахунянца;
- методом конечных элементов (МКЭ).

Расчет устоев только по одному из известных методов мог привести к ошибкам, поскольку все методы имеют не только преимущества, но и определенные недостатки.

Метод алгебраического суммирования применим как к однородным, так и к разнородным основаниям при произвольном очертании поверхности скольжения. Однако с точки зрения строительной механики грунтов он недостаточно точен, так как в нем не учитываются внутренние силы взаимодействия между отдельными отсеками сползающего массива.

Метод Г.М. Шахунянца учитывает силы взаимодействия между отсеками оползневого тела, допускает любую форму поверхности сползания и, что особенно важно, позволяет определять величины оползневых давлений при любых заданных (нормируемых) коэффициентах устойчивости.

Кроме указанных методов существует метод расчета на сдвиг по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Несмотря на его простоту, он плохо отражает физические процессы, происходящие в неоднородных и слоистых основаниях.

Метод Н.Н. Маслова вводит не новую, ненормативную характеристику грунта – «угол трения». Он основывается на том факте, что зависимость между $\sigma$ и $\tau$ нелинейная. Однако при проведении инженерно-геологических изысканий не исследуются зависимости $\tau = f(\sigma$ и $c)$; в этом случае метод Н.Н. Маслова дает результаты близкие к методу Г.М. Шахунянца.

Новые возможности открывает метод МКЭ, но сложность заключается в правильном отображении обьекта в математической модели со всеми фактическими физико-механическими характеристиками грунтового массива.

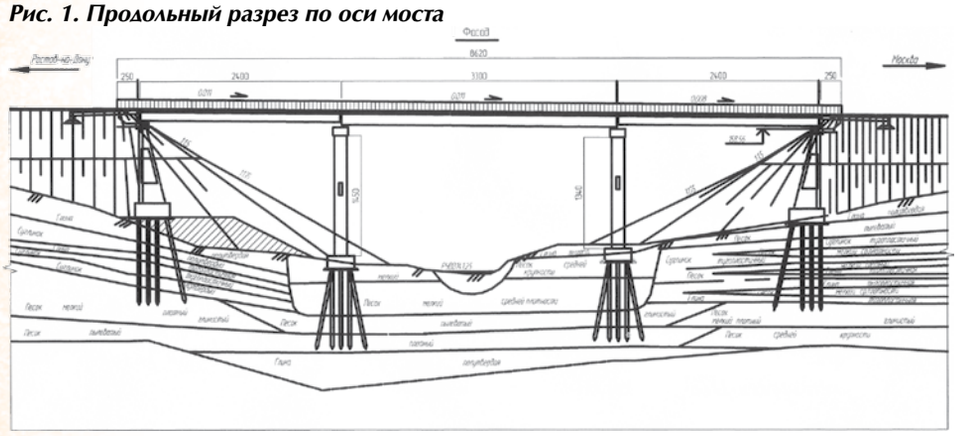
В качестве аппарата расчета методом конечных элементов (МКЭ) была использована программа PLAXIS. Проведение расчетов по программе PLAXIS позволяет вычислить напряжения, определить коэффициент устойчивости, первоначальное давление от веса грунта, рассчитать деформацию и поведение грунтового массива от прилагаемой нагрузки, определить поровое давление и др.

Для выполнения расчетов была построена математическая модель устоев моста через овраг при реконструкции автодороги М-4 «Дон».
В качестве входных данных в программу расчета вводятся:

- геометрические параметры сооружения, полученные из проектной документации;
- геологическое строение геомассива в створе моста и физико-механические характеристики грунтов основания и насыпи (по данным инженерно-геологических изысканий);
- временные и постоянные нагрузки на концевых участках насыпи.

При первых расчетах устоев без насыпи было определено, что наиболее слабым

***Рис. 1. Продольный разрез по оси моста***



местом в насыпи является прослойка грунта из глины.

Следующий этап – расчет устоев с отсыпанной насыпью методом МКЭ. Насыпь состоит из песка. По предварительным расчетам устоев по программе PLAXIS видно, что наиболее нестабильными являются слои насыпного грунта и глины (*рис. 2*). На данном этапе уже можно планировать мероприятия по увеличению устойчивости узла сопряжения. Характеристикой устойчивости является коэффициент устойчивости $K_{уст}$. Коэффициент устойчивости определяется формулой:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} T_{уд-i}}{\sum_{i=1}^{i=m} T_{сд-i}}, \quad (1),$$

где $m$ – количество отсеков, на которые разбито сползающее тело геомассива; $T_{уд-i}$ и $T_{сд-i}$ – удерживающие и сдвигающие силы, действующие на $i$-й отсек.

Коэффициент устойчивости был рассчитан тремя методами (см. *таблицу*).

По всем трем методам коэффициент устойчивости оказался меньше 1, что говорит о нестабильности узла сопряжения. Данный вывод подтверждают геодезические сьемки. Предельное равновесие характеризуется коэффициентом устойчивости 1. При увеличении веса насыпи (например, после выпадения осадков и др.) коэффициент будет уменьшаться, что приведет к смещениям в насыпи.

К сожалению, в нормативных документах по мостостроению вопросы защиты мостов от оползней не отражены. Однако по сложившейся практике принято коэффициент устойчивости при проектировании мостов принимать не менее 1,4, хотя в различных нормативных документах и технической литературе по этому вопросу нет единого мнения.

***Таблица. Результаты расчета $K_{уст}$ различными методами***

| Метод алгебраического суммирования | | | Метод Г.М. Шахунянца | МКЭ (PLAXIS) |
|---|---|---|---|---|
| СНиП 2.05.03-84* | Руководство по расчету фундаментов глубокого заложения | СНиП 22-02-2003 | | |
| 0,93 | 0,73 | 0,78 | 0,856 | 0,987 |

Программа PLAXIS также позволила показать вероятный механизм разрушения устоев (*рис. 3*).

Хотелось также отметить, что концевой участок насыпи отсыпан из плохо уплотненных и плохо фильтрующих песков, что является дополнительным негативным фактором, влияющим на уменьшение устойчивости. В последней редакции СНиП 2.05.03-84* допускается отсыпка конусов из песков с коэффициентом фильтрации $K_ф$<2,0 м/сут, однако с применением специальных конструктивно-технологических мероприятий (например, армирование грунта). Однако этот пункт СНиПа составлен неудачно. Под армированием понимается укладка между уплотненными слоями песка высокопрочной геосинтетики, воспринимающей большие растягивающие напряжения. Прокладка из слоев дорнита лишь улучшает отвод воды. Характерно, что аналогичные явления смещения устоев отмечены и на других мостовых сооружениях, строящихся в этом регионе.

Потенциально оползневые склоны встречались в практике НИЦ «Мосты» на ряде обьектов мостостроения. При этом для устройства устоев на потенциально оползневых склонах нужны упреждающие конструктивно-технологические мероприятия.

Одним из решений по данному обьекту является метод укрепления откосов по варианту с геотекстилем и ступенчатой вырезкой естественного грунта. Применение данного метода позволяет увеличить коэффициент устойчивости, рассчитанный по программе PLAXIS, до 1,55, что больше упомянутого ранее 1,4.

Хотелось отметить тот факт, что по расчетам в сечении, соответствующем расположению устоя, имеем оползневое давление, равное $E_i$ = *116,6* тс/п.м., которое не может быть воспринято несущими элементами устоя.

Основные выводы:

- разобрать грунт насыпи до конуса;
- спланировать склон в виде горизонтальных ступеней;
- отсыпать насыпь качественным песком с требуемым коэффициентом упрочнения;
- проармировать засыпку прочной геосинтетикой;
- отсыпать контрбанкет на дно оврага;
- оградить ручей стенкой из габионов.

**А.Д. Соколов,** к.т.н.,
ведущий научный сотрудник НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС,
член-корреспондент РАЕН

**Е.В. Фальковский,** к.т.н.,
ведущий научный сотрудник НИЦ «Мосты» ОАО ЦНИИС

***Рис. 2. Карта напряжений в насыпи при предварительном расчете***

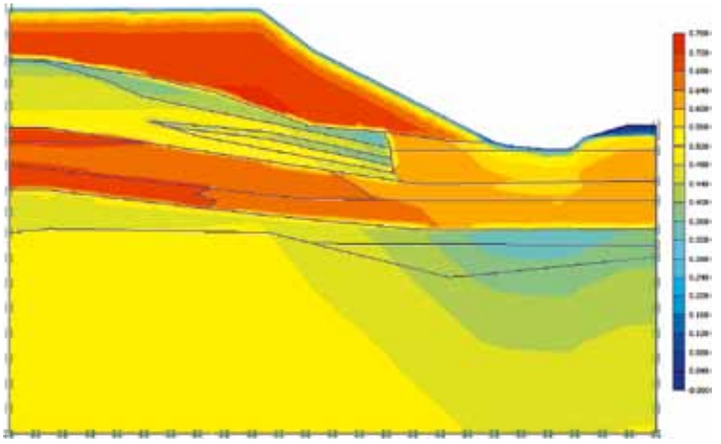
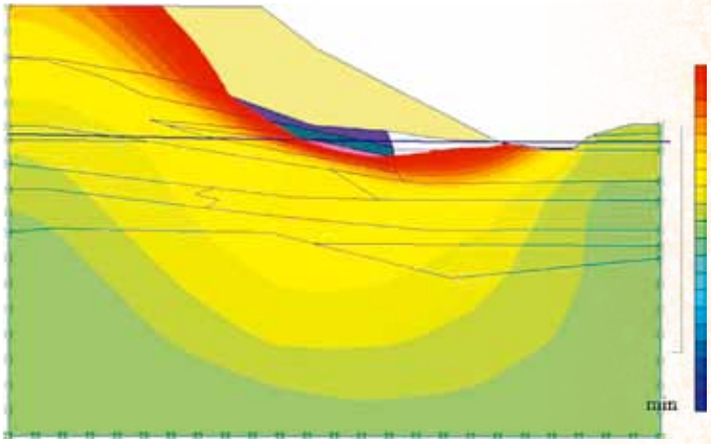



***Рис. 3. Приращения полных смещений левого устоя, иллюстрирующие примененный механизм разрушения устоев на окончательных этапах расчета***