УДК 624.154: 699.8: 551.448

А.Л. Готман, Р.Н. Магзумов

Институт «БашНИИстрой», Уфа, Россия

МЕТОД РАСЧЕТА СВАИ В СОСТАВЕ СВАЙНОГО ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА

В исследованиях, приведенных в статье, рассматривается определение нагрузок на конструкции свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала и разработка метода расчета свай с учетом горизонтального давления на сваи от обрушивающегося грунта на бортах провала. Исследования проводились численным способом с использованием геотехнических программ Midas GTS, Plaxis 2D, Plaxis 3D.

Разработана методика расчета свай при линейной аппроксимации горизонтального давления грунта.

Ключевые слова: карстовый провал, горизонтальное давление грунта, свайные фундаменты.

A.L. Gotman, R.N. Magzumov

Scientific-Research Institute «BashNIISTroy», Ufa, Russian Federation

METHOD OF ANALYSIS OF A PILE IN STRIP FOUNDATION WHILE KARST HOLE

Investigations described in the paper, show evaluation of pile strip foundation loads while karst hole formation and development of pile analysis method considering pile lateral pressure due to soil collapse on the hole slopes.

Investigations have been carried out numerically with the use of the geotechnical programs Midas GTS, Plaxis 2D, Plaxis 3D.

Pile analysis method with the linear approximation of soil lateral pressure has been worked out.

Keywords: karst hole, lateral soil pressure, pile foundations.

Расчет и проектирование карстозащитных свайных фундаментов по действующим нормативным документам, как правило, производятся в следующем порядке:

– определение вертикальной нагрузки на сваи от здания или сооружения с учетом увеличения нагрузки вокруг провала (сваи, попадающие в карстовый провал, считаются «выпавшими» и исключаются из расчета);

- определение расчетного сопротивления, сечения, шага и длины свай;

- расчет вертикального коэффициента жесткости свай в «ослабленной зоне» вблизи провала и коэффициента постели в основании ростверка (усовершенствованная методика расчета вертикального коэффициента жесткости свай представлена в работе Д.А. Давлетярова [1]);

- расчет ростверка или фундаментной плиты совместно с вышележащими конструкциями [2].

Механизм формирования карстового провала [3–5] показывает, что образование провала сопровождается гравитационным сдвижением грунта на бортах провала. При наличии свай в грунтовом массиве на краях провала обрушивающийся грунт передает на них горизонтальное давление. Приведенный выше алгоритм расчета не учитывает возникающее горизонтальное давление на сваи.

Возможное разрушение свай, расположенных на границе провала приведет к увеличению расчетного пролета ростверка над карстовым провалом как минимум на $2a$, где a – шаг свай. Это, в свою очередь, приведет к увеличению внутренних усилий в ростверке. Проектирование ростверка с учетом данного фактора позволит повысить надежность фундаментов, однако приведет к увеличению армирования и, возможно, сечения ростверка. Если же данное обстоятельство не было учтено, то несущей способности ростверка на изгиб может быть недостаточно и это может привести к аварийной ситуации.

Целью данных исследований является совершенствование метода расчета ленточных свайных фундаментов зданий при образовании карстового провала с учетом возникающего горизонтального давления на сваи при обрушении грунта на границах провала.

Для построения расчетной схемы и получения аналитического решения необходимо определить закономерности формирования горизонтального давления грунта на сваи при обрушении борта карстового провала.

Свайный ряд ленточного фундамента условно можно представить в виде гибкой подпорной стенки при образовании провала. Для подпорных сооружений давление грунта, как правило, определяется по теории Кулона. Однако давление грунта зависит от перемещения стенки. Поэтому с учетом шарнирного закрепления верхнего конца сваи давление грунта может существенно отличаться от определяемого по

теории Кулона. Это подтверждается в исследованиях многих ученых, например Г. Чеботарева, П. Роу, К. Терцаги, Б. Хансена, Г.А. Дубровы, Б.Ф. Горюнова, Ю.М. Шихиева, Ю.М. Гончарова, Т.А. Маликовой [6]. Полученные эпюры давлений имеют общую особенность в виде увеличения в верхней части стенки в месте её крепления.

Современные численные методы позволяют исследовать данную задачу без проведения технически сложных и трудоемких натурных экспериментов. Методы численного анализа позволяют учесть совокупность физико-механических и прочностных параметров грунтового основания и конструкций фундамента. Так, в статье N.J. Sartein, F. Lancelot & N.J. O’Riordan [и др.] [7] численным моделированием в программном комплексе LS-DYNA определялось давление песчаного грунта на мостовые опоры из буронабивных свай при образовании карстового провала вблизи опорами. Схема работы свай в этом случае близка к схеме работы отдельно стоящих свай на горизонтальную нагрузку, имеющих жесткое защемление верхнего конца. По результатам расчетов наибольшее горизонтальное давление на сваю составило $2K_p$, где K_p – коэффициент бокового давления грунта по Ренкину. Давление на сваю, по численным экспериментам, действует только на небольшом участке свай из-за «стекания» грунта в провал по мере его развития. Авторы статьи отмечают, что задачи расчета фундаментов при образовании карстовых провалов могут эффективно решаться с помощью современных программ конечно-элементного анализа.

Стоит отметить, что использование методов численного анализа не всегда представляется возможным из-за необходимости применять специализированные компьютерные программы, требующие знаний и навыков владения программной средой. Данный метод больше подходит для изучения проблемы с научно-исследовательской точки зрения. Для практических целей необходим простой инженерный метод расчета.

С целью определения закономерностей формирования давления на сваю были выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтового массива и свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала [8]. Исследования выполнялись методом конечных элементов геотехнических программ Plaxis 2D, Plaxis 3D Foundation, Midas GTS, имеющих верифицированные модели грунтов. Основные предпосылки для решения задачи:

- карстовый провал образуется по круглоцилиндрической схеме;
- грунт на бортах провала находится в предельном состоянии, описываемом уравнением Кулона – Мора;
- сопряжение головы сваи с ростверком является шарнирным.

По результатам моделирования в связных грунтах изгибающие моменты в сваях превышают допускаемые при соотношении глубины провала s_{obs} к длине сваи $L_{св}$ более 0,4 м и при глубине провала более 4 м. Это свидетельствует о необходимости разработки метода определения изгибающих моментов, возникающих в свае в результате обрушения грунта на бортах провала.

По результатам численного моделирования в Midas GTS получены эпюры горизонтального давления на сваю. Характерной особенностью эпюр является их увеличение в верхней части сваи в месте шарнирного сопряжения сваи с ростверком (рис. 1), аналогичное полученным в по натурным и модельным экспериментам [6, 9].

Рис. 1. Эпюра горизонтального давления на сваю. Зоны формирования давлений грунта

Анализ результатов численных исследований позволил аппроксимировать фактическую эпюру давления грунта более простыми функциями, что, в свою очередь, позволяет получить математически более простой метод расчета сваи. Функция аппроксимации выбирает-

ся исходя из некоторого приведенного давления q_n , определяемого по формуле

$$q_n = 0,4s_{\text{obs}} \operatorname{ctg}\left(45^\circ \frac{\varphi}{2}\right). \quad (1)$$

При значении $q_n < 20 \text{ кН/м}^2$ эпюра давления грунта на сваю q_z аппроксимируется линейно возрастающей функцией от глубины z ,

$$q_z = kz. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности k вычисляется исходя из условия, что при $z = s_{\text{obs}}$ $q_z = P_a$, где P_a – активное давление грунта по Кулону, определенное на глубине карстового провала s_{obs} .

При $q_n > 20 \text{ кН/м}^2$ эпюра давления грунта на сваю q_z аппроксимируется билинейной функцией. От головы сваи до глубины $z = 0,4s_{\text{obs}}$ давление принимается равномерно распределенной, определяемой по формуле

$$q_1 = \frac{1}{3} \gamma \cdot 0,4s_{\text{obs}} (1 - \sin \varphi), \quad (3)$$

где γ – удельный вес грунта.

Ниже глубины $0,4s_{\text{obs}}$ – эпюра давления возрастает по линейному закону до величины, определяемой по формуле

$$q_2 = p_0 - q_n = p_0 - 0,4s_{\text{obs}} \cdot \operatorname{ctg}\left(45^\circ \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

где p_0 – давление покоя на глубине s_{obs} .

В приложении В СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» имеется методика расчета свай на комбинированную нагрузку. Грунтовое основание рассматривается как упругая линейно-деформируемая среда. Расчетная схема представляет собой стержень, упруго защемленный в грунте и имеющий свободную длину. К голове сваи приложены усилия M , Q , N . При этом голова сваи не имеет закрепления и принимается свободной. В исследуемой задаче голова сваи имеет шарнирно-неподвижное сопряжение с ростверком. Поэтому применение нормативного метода не представляется возможным и необходимо разработать метод, учитывающий данное граничное условие. Метод расчета свай с жестким защемлением головы и нагрузкой по линейно возрас-

тающей функции в виде треугольной эпюры описан в работе А.Л. Готман и М.А. Суворова [10].

Представим расчетную схему сваи как изгибаемый от горизонтального давления грунта q_z стержень длиной $L_{св}$, верхний конец которого шарнирно закреплен в ростверке, а нижний – упруго защемлен в уровне поверхности скольжения обрушивающегося массива грунта. Стержень примем расположенным на упругом основании Фусса-Винклера.

Выберем систему координат yz . Ось z направим вниз и совместим с осью сваи. Ось y совместим с поверхностью грунта и направим вправо. Обозначим через u_z горизонтальное перемещение сваи на глубине z от поверхности грунта, а через φ_z – угол поворота сечения сваи в этом месте. Через M_z обозначим изгибающий момент в поперечном сечении сваи на глубине z , через Q_z – поперечную силу в этом сечении. В свае в месте её шарнирного сопряжения с ростверком действуют поперечная сила Q_q , а угол поворота этого сечения равен φ_0 . Действующую на сваю нагрузку примем линейно возрастающей, определяемой по формуле (2), т.е. при $q_n < 20 \text{ кН/м}^2$. Расчетная схема сваи с принятыми обозначениями представлена на рис. 2.

Рис. 2. Расчетная схема сваи при линейно возрастающем распределении горизонтального давления грунта

Исходя из расчетной схемы, запишем граничные условия.

Усилия в свае M_z и Q_z связаны с перемещением u_z и углом поворота φ_z зависимостями

$$\frac{du_z}{dz} = -\varphi_z; \quad \frac{d\varphi_z}{dz} = -\frac{M_z}{EI}; \quad \frac{M_z}{dz} = Q_z; \quad \frac{dQ_z}{dz} = q_z \quad (5)$$

где q_z – давление грунта на сваю; E – модуль упругости материала свай; I – момент инерции поперечного сечения свай.

На глубине h , равной глубине карстового провала s_{obs} , от подошвы ростверка перемещение свай u_{oh} и угол поворота φ_{oh} определяются по формулам

$$\begin{aligned} u_{oh} &= M_{qh}\delta_{HM} + Q_{qh}\delta_{HH}, \\ \varphi_{oh} &= M_{qh}\delta_{MM} + Q_{qh}\delta_{MH}, \end{aligned} \quad (6)$$

где δ_{HH} и δ_{MH} – горизонтальное перемещение и угол поворота свай соответственно в уровне поверхности скольжения от действия поперечной силы $Q_{qh}=1$; δ_{MM} и δ_{HM} – то же от изгибающего момента $M_{qh}=1$.

Определим перемещение свай u_{oh} и угол поворота φ_{oh} на глубине h , используя следующий подход. Примем сваю, защемленной на глубине h . Тогда перемещение u_{oh} и угол поворота φ_{oh} численно будут равны перемещению и углу поворота свободного конца консольной балки.

$$u_{oh} = \varphi_0 h - \frac{Q_q h^3}{3EI} + \frac{qh^4}{30EI}; \quad \varphi_{oh} = -\varphi_0 + \frac{Q_q h^2}{2EI} - \frac{qh^3}{24EI}. \quad (7)$$

Приравнивая правые части выражений (6) и (7) и записывая уравнения равновесия на глубине h , получим систему из четырех уравнений, в которых неизвестными являются φ_0 , Q_q , M_{qh} , Q_{qh} :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_0 h EI - \frac{Q_q h^3}{3} + \frac{qh^4}{30} &= EI(M_{qh}\delta_{HM} + Q_{qh}\delta_{HH}), \\ -\left(-\varphi_0 EI + \frac{Q_q h^2}{2} - \frac{qh^3}{24}\right) &= EI(M_{qh}\delta_{MM} + Q_{qh}\delta_{MH}), \\ -Q_q h + \frac{qh^2}{6} &= M_{qh}, \\ -Q_q + \frac{qh}{2} &= Q_{qh}. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Решение системы уравнений относительно Q_q и φ_0 даст следующие выражения:

$$Q_q = \frac{qh(h^3 + A)}{20(h^3 + B)}, \quad \varphi_0 = \frac{qh^2(h^4 + C)}{60EI(h^3 + B)}, \quad (9)$$

где через A, B, C обозначены следующие выражения:

$$\begin{aligned} A &= 20EI(3\delta_{HH} - 2h\delta_{HM} - \delta_{MM}h^2), \\ B &= 6EI(\delta_{HH} - \delta_{MM}h^2), \\ C &= 120EI^2(\delta_{MM}\delta_{HH} - \delta_{MM}^2) + h \cdot EI(33\delta_{HH}h - 75\delta_{HM}h + 8\delta_{MM}h^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Горизонтальные деформации ствола сваи описываются разными уравнениями на двух участках выше и ниже отметки дна карстового провала. Как показало численное моделирование, максимальный изгибающий момент и горизонтальное перемещение ствола сваи наблюдаются на участке сваи выше отметки дна карстового провала. Поэтому целесообразным является определение уравнения изгиба балки и, соответственно, внутренних усилий для участка сваи от низа ростверка до дна карстового провала.

Запишем дифференциальное уравнение изгиба сваи

$$\frac{d^4u}{dz^4} = -\frac{q_z}{EI}. \quad (11)$$

В данном случае нагрузка является линейно возрастающей функцией от глубины

$$q_z = kz. \quad (12)$$

Последовательно интегрируя дифференциальное уравнение (11), находим функцию $u(z)$:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^3u}{dz^3} &= -\frac{kz^2}{2} + C_1, \\ EI \frac{d^2u}{dz^2} &= -\frac{kz^3}{6} + C_1z + C_2, \\ EI \frac{du}{dz} &= -\frac{kz^4}{24} + \frac{C_1z^2}{2} + C_2z + C_3EI, \\ u(z) &= \frac{1}{EI} \left(-\frac{kz^5}{120} + \frac{C_1z^3}{6} + \frac{C_2z^2}{2} \right) + C_3z + C_4. \end{aligned} \quad (13)$$

При шарнирном закреплении верхнего конца свай справедливы следующие граничные условия:

$$u(z=0)=0; \frac{du}{dz}(z=0)=\varphi_0; \frac{d^2u}{dz^2}(z=0)=0; \frac{d^3u}{dz^3}(z=0)=Q_q.$$

С учетом этих граничных условий постоянные интегрирования

$$C_1 = Q_q; C_2 = 0; C_3 = \varphi_0; C_4 = 0.$$

Таким образом, получим уравнение изгиба свай до глубины $h = s_{\text{obs}}$,

$$u(z) = \frac{z}{EI} \left(-\frac{kz^4}{120} + \frac{Q_q z^2}{6} \right) - \varphi_0 z. \quad (14)$$

Изгибающие моменты определяются из уравнения

$$M(z) = \frac{d^2u}{dz^2} EI = \frac{kz^3}{6} + Q_q z. \quad (15)$$

Полученная методика позволяет выполнить поверочный расчет свай, расположенной на краю карстового провала и воспринимающей горизонтальное давление от обрушивающегося грунта на бортах провала. Критерием работоспособности свай является условие $M_{\text{max}} < M_{\text{ult}}$, где M_{max} – наибольший изгибающий момент в свае, определяемый по формуле (15), M_{ult} – предельно допускаемый момент на сваю, определяемый по соответствующим сериям или ГОСТом на сваю.

Библиографический список

1. Давлетяров Д.А. Расчет коэффициента жесткости свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях: материалы всерос конф. – Уфа, 2012. – С. 35–41.
2. Готман Н.З., Готман А.Л., Давлетяров Д.А. Учет совместной работы здания и основания в расчетах фундаментов при образовании карстовых деформаций // Взаимодействие сооружений и оснований. Методы расчета и инженерная практика: труды междунар. конф. по геотехнике. – СПб., 2005. – Т. 2. – С. 69–75.
3. Адерхолд Г.И. Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий: моногр. – Нижний Новгород, 2010. – 112 с.

4. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.

5. Хоменко В.П. Карстово-обвальные процессы «простого» типа: полевые исследования // Инженерная геология. – 2009. – № 4. – С. 40–48.

6. Ренгач В.Н. Шпунтовые стенки (расчет и проектирование). – Л.: Стройиздат, 1970. – С. 106.

7. Design loading of deep foundations subject to sinkhole hazard / N.J. Sartain, F. Lancelot & N.J. O’Riordan, R. Sturt // Proceedinf of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2009. – Vol. 2. – P. 1267–1270.

8. Готман А.Л., Магзумов Р.Н. Исследование НДС свай на границе карстового провала // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 4 (39). – С. 125–132.

9. Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния гибких ограждений с распоркой в процессе поэтапной разработки грунта // Известия КазГАСУ. Основания и фундаменты, подземные сооружения. – 2011. – № 2 (16). – С. 129–135.

10. Готман А.Л., Суворов М.А. Противооползневые многорядные конструкции из свай // Геотехнические проблемы строительства, реконструкции и восстановления надежности зданий и сооружений: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Липецк: Изд-во Лип. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 21–26.

References

1. Davletyarov D.A. Raschet koeffitsienta zhestkosti svaynogo lentchnogo fundamenta pri obrazovanii karstovogo provala [Analysis of stiffness ratio of a pile strip foundation while karst hole formation]. *Trudy Rossiyskoy konferentsii s mezh-dunarodnym uchastiem “Geotekhnicheskie problemy proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh”*. Ufa, 2012, pp. 35-41.

2. Gotman N.Z., Gotman A.L., Davletyarov D.A. Uchet sovmestnoy raboty zdaniya i osnovaniya v raschetakh fundamentov pri obrazovanii karstovoykh deformatsij [Account of combined behavior of a structure and foundation soil in foundations analysis when karst strains formation]. *Proceedings of International Conference on geotechnics Interaction of structures and foundation soils. Design methods and engineering practice*. Saint Petersburg: ASV, 2005, vol. 2, pp. 69-75.

3. Aderkhold G.I. Klassifikatsiya provalov i mul'd osedaniy v karstoopasnykh rayonakh Gessena. Rekomendatsii po otsenke geotekhnicheskikh riskov pri provedenii stroitel'nykh meropriyatiy [Classification of holes and settlements in karst areas of Gessen. Recommendations on evaluation of geotechnical risks while construction]. Nizhniy Novgorod, 2010, 112 p.

4. Tolmachev V.V., Troitskiy G.M., Khomenko V.P. Inzhenerno-stroitel'noe osvoenie zakarstovannykh territorij [Engineering-construction development of karsted areas]. Moscow: Stroyisdat, 1986. 176 p.

5. Khomenko V.P. Karstovo-obval'nye protsessy «prostogo» tipa: polevye issledovaniya [Karst processes of the “simple” type: field investigations]. *Inzhenernaya geologiya*. 2009, no. 4, pp. 40-48.

6. Rengach V.N. Shpuntovye stenki (raschet i proektirovanie) [Sheet piling (analysis and design)]. St. Petersburg, 1970, 106 p.

7. Sartain N.J., Lancelot F., O’Riordan N.J., Sturt R. Design loading of deep foundations subject to sinkhole hazard. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, vol. 2, pp. 1267-1270.

8. Gotman A.L., Magzumov R.N. Issledovanie NDS svay na granitse karstovogo provala [Investigation of stressed-deformed state of piles at the boundary of the karst hole]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. St. Petersburg, 2013, no. 4 (39), pp. 125-132.

9. Mirsayapov I.T., Khasanov R.R. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gibkikh ograzhdeniy s rasporkoy v protsesse poetopnoy razrabotki grunta [Experimental investigations of stressed-deformed state of flexible enclosures with the brace in the process of step by step earthwork]. *Izvestiya KazGASU. Osnovaniya i fundamentey, podzemnye sooruzheniya*, Kazan, 2011, no. 2 (16), pp. 129-135.

10. Gotman A.L., Suvorov M.A. Landslide protection multi-row pile constructions *Geotechnical problems of construction, reconstruction and rehabilitation of buildings and structures reliability: Proceedings of International Scient.-technical Conference*. Lipetskij gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. 2007. pp. 21-26.

Об авторах

Готман Альфред Леонидович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Магзумов Раиль Наилович (Уфа, Россия) – младший научный сотрудник отдела оснований и фундаментов института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

About the authors

Gotman Alfred Leonidovich (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Scences, Professor, Deputy Director of Science of the Scientific-Research Institute «BashNIISTroy»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Magzumov Rail' Nailovich (Ufa, Russian Federation) – Junior Research Worker, Institute «BashNIISTroy»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Получено 18.03.2014