

УДК 624.159.1-004.94

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-268-279

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ЭПЮРЫ НОРМАЛЬНЫХ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЕРЕКРЕСТНО- БАЛОЧНОГО ФУНДАМЕНТА И НАКЛОННОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ

Е. В. Зеленин, Б. Ю. Барыкин, А. Б. Барыкин

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского
г. Симферополь, Россия

Аннотация. Предложена методика для определения перераспределенной эпюры нормальных контактных напряжений при совместном взаимодействии перекрестно-балочного фундамента и наклонного грунтового основания ($\alpha=15^\circ, 30^\circ$) при образовании внезапного карстового провала на основе полученных результатов модельных исследований в лабораторных условиях с применением эквивалентного грунта. Описана методика определения напряжений, основанная на эмпирических зависимостях. Полученные результаты дают возможность определить основные параметры НДС при совместном взаимодействии перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания в условиях закарстованных территорий, что позволит на этапе предпроектных работ оценить все риски застройки и предусмотреть необходимые решения по инженерной защите. Представлена степенная функция к определению расчетного диаметра карстовой полости, позволяющая проводить варианты расчеты в зависимости от месторасположения карстовой полости, ее диаметра и угла наклона склона, на котором планируется вести строительство.

Ключевые слова: модельные исследования, карст, перекрестно-балочный фундамент, наклонное основание, склон

ON THE ISSUE OF DETERMINING THE TRANSFORMED DIAGRAM OF NORMAL CONTACT STRESSES DURING THE JOINT INTERACTION OF A CROSS-BEAM FOUNDATION AND AN INCLINED BASE DURING THE SUDDEN FORMATION OF KARST FAILURES

E. V. Zelenin, A. B. Barykin, B. Y. Barykin

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Annotation. A method for determining the redistributed normal contact stress diagram for the combined interaction of a cross-beam foundation and an inclined soil base ($\alpha=15^\circ, 30^\circ$) during the formation of a sudden karst sinkhole is proposed. This method is based on the results of laboratory modeling studies using equivalent soil. A stress determination technique based on empirical relationships is described. The obtained results make it possible to determine the key stress-strain state parameters for the combined interaction of a cross-beam foundation and a sloped foundation in karst areas. This will enable the assessment of all development risks during the pre-design phase and the provision of necessary engineering protection solutions. A power function for determining the estimated diameter of a karst cavity is presented, enabling calculations based on the location of the karst cavity, its diameter, and the slope angle of the planned construction site.

Keywords: model studies, karst, cross-beam foundation, inclined base, slope

Введение

Анализ, планирование, возведение и контроль состояния зданий и конструкций на территориях с карстовыми процессами представляют собой сложные задачи. Из-за непредсказуемости геологических изменений, вызванных карстовыми деформациями, сбор и анализ данных для проектирования требуют больше усилий, чем в обычных условиях. Карстовые процессы относятся к числу наиболее сложных и трудно предсказуемых явлений в геологии и инженерной геологии [5]. По итогам комплексных инженерно-геологических исследований участков под строительство, где есть вероятность карстовых процессов, нужно принимать решение о возможности строительства. Даже если на данный момент активного развития карста не наблюдается, важно учесть риск возникновения провалов в будущем и их возможные размеры. Нужно подобрать такую конструкцию фундамента, которая будет не только экономически выгодной, но и позволит минимизировать последствия возможного разрушения основания. Для этого следует применить геотехнический метод противокарстовой защиты. Затем нужно проанализировать, как появление пустоты под фундаментом может повлиять на его целостность. Важно предотвратить разрушение конструкции в случае увеличения пролётной части балки и изменения распределения контактных давлений под подошвой. В настоящее время на южном берегу Крыма уже застроена большая часть удобных площадок, подходящих для строительства. Это вынуждает инвесторов и застройщиков обращать внимание на территории, которые раньше не рассматривались из-за неблагоприятных экзогенных процессов. Один из таких проблемных процессов в Крыму — карст, занимающий почти три четверти общей площади региона. В южной части гористой местности полуострова пользуется популярностью технология устройства фундаментов без террасирования склона используя перекрестно-балочный фундамент [7]. На сегодняшний день нормативной документации РФ и в зарубежных источниках [1–6, 8–17] отсутствует информация, в которой даны рекомендации к определению действительной работы фундаментов мелкого заложения в условиях наклонных участков с применением технологии принципа отказа от террасирования в условиях закарстованных территорий. В статье предложена методика определения нормальных контактных напряжений под конструкциями фундаментов мелкого заложения, устроенных на наклонных участках в условиях закарстованных территорий, основанная на полученных соотношениях эпюр под фундаментными балками ненарушенного основания и после образования карстовых деформаций.

Основная часть

В данной работе анализируются результаты модельных исследований [18] и полученных эмпирическим методом результатов на основе сравнения

характера взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания до и после образования карстовых деформаций в наклонном массиве. Обычно при строительстве, состав грунта, на котором будет возводиться сооружение, включает в себя несколько разных элементов и не является одинаковым по всей площади. Характеристики этой сложной системы могут значительно различаться в зависимости от местоположения строительной площадки. Сегодня проектировщикам особенно трудно проводить геотехнические расчёты, когда есть вероятность образования карстовых пустот. Это связано с тем, что сложно определить деформации основания и нормальные контактные напряжения в наклонных грунтах.

В данных исследованиях покровная толща моделировалась однослойным грунтом со среднезвешенными показателями грунтовых напластований. Карстующиеся грунты не моделировались, моделировались только сами карстовые деформации с помощью применения разработанного устройства [20], позволяющего моделировать обрушение свода карстовой полости в любой точке грунтового массива в экспериментальной установке (рис. 1).

Перед началом проведения модельных исследований был использован метод математического планирования экспериментов. В ходе работы рассматривались способы воздействия на объект исследования (факторы) с учётом строгих требований к ним и их сочетанию. Матрица планирования представлена в табл. 1.

Применение эквивалентного модельного грунта позволило применить масштабный коэффициент и избежать трудоемкость при организации натурных исследований. Масштабный коэффициент составил 1:20.

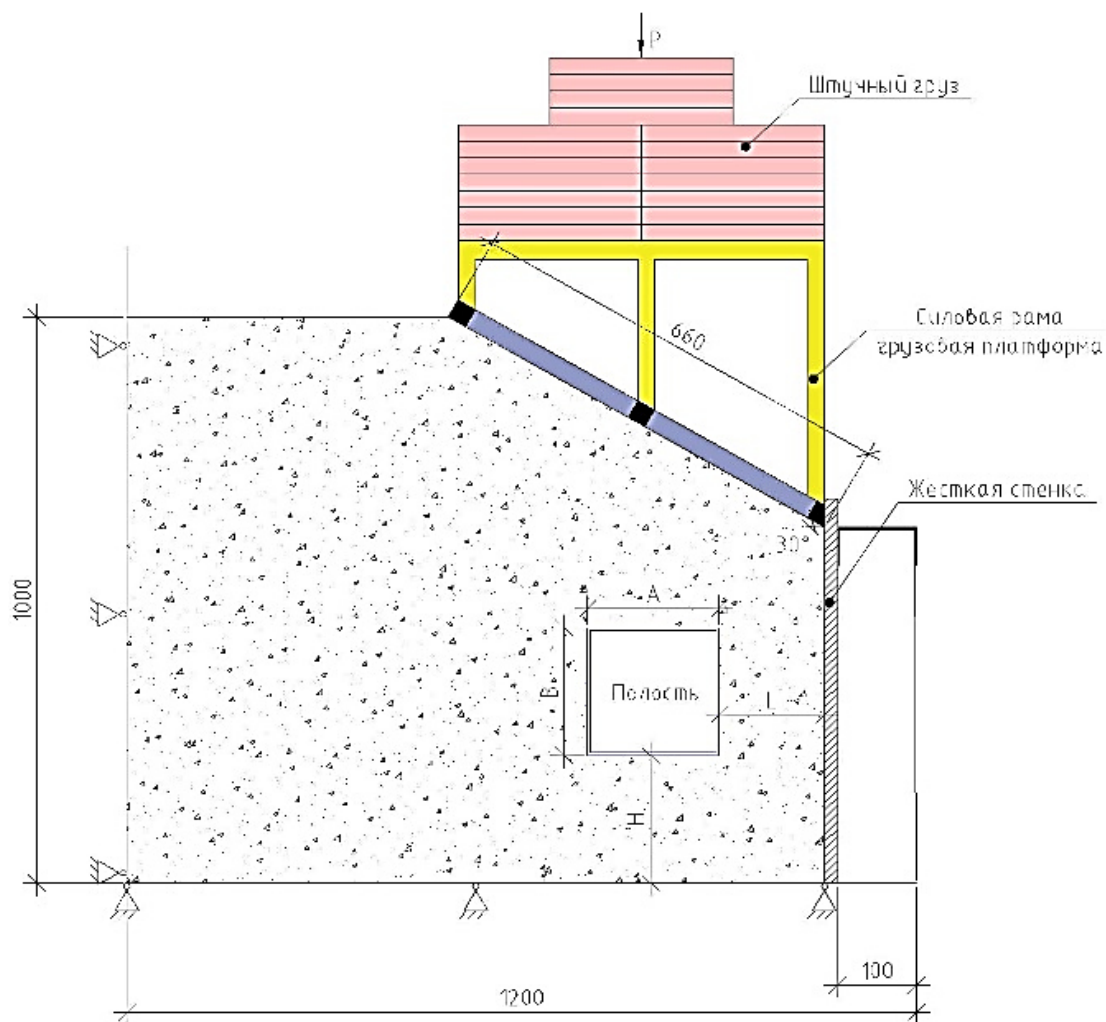
Таблица 1. Матрица планирования в качественных показателях с использованием линейного масштаба (М 1:20)

Номер опыта (расчетный случай)	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4
1	+1	$D = 0.1$ м	$H_{\text{до центра}} = 3D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 2D_{\min}$	15
2	+1	$D = 0.2$ м	$H_{\text{до центра}} = 3D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 2D_{\min}$	30
3	+1	$D = 0.1$ м	$H_{\text{до центра}} = 4D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 2D_{\min}$	30
4	+1	$D = 0.2$ м	$H_{\text{до центра}} = 4D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 2D_{\min}$	15
5	+1	$D = 0.1$ м	$H_{\text{до центра}} = 3D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 5D_{\min}$	30
6	+1	$D = 0.2$ м	$H_{\text{до центра}} = 3D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 5D_{\min}$	15
7	+1	$D = 0.1$ м	$H_{\text{до центра}} = 4D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 5D_{\min}$	15
8	+1	$D = 0.2$ м	$H_{\text{до центра}} = 4D_{\min}$	$L_{\text{до центра}} = 5D_{\min}$	30

По полученным результатам проведения модельных испытаний в лабораторных условиях, были выполнены совмещенные схемы, на которых отображается схема карстовых провалов и параметром изменения эпюр нормальных контактных напряжений (рис. 2–9).



a



б

Рис. 1. Общий вид устройства, моделирующего карстовый провал (*a*) и схема расположения модели карстовой полости в экспериментальной установке (*б*)

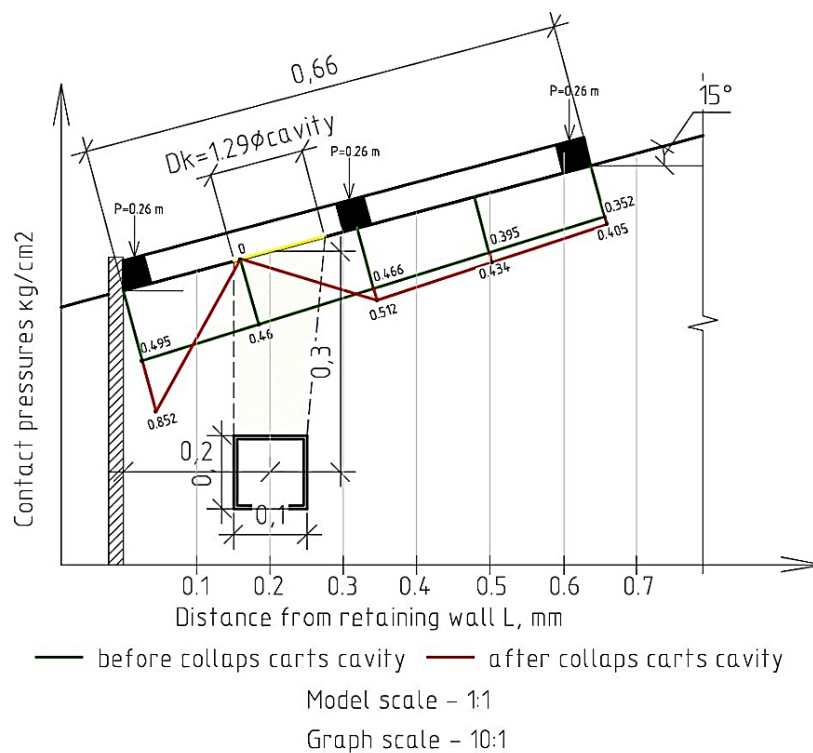


Рис. 2. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 1

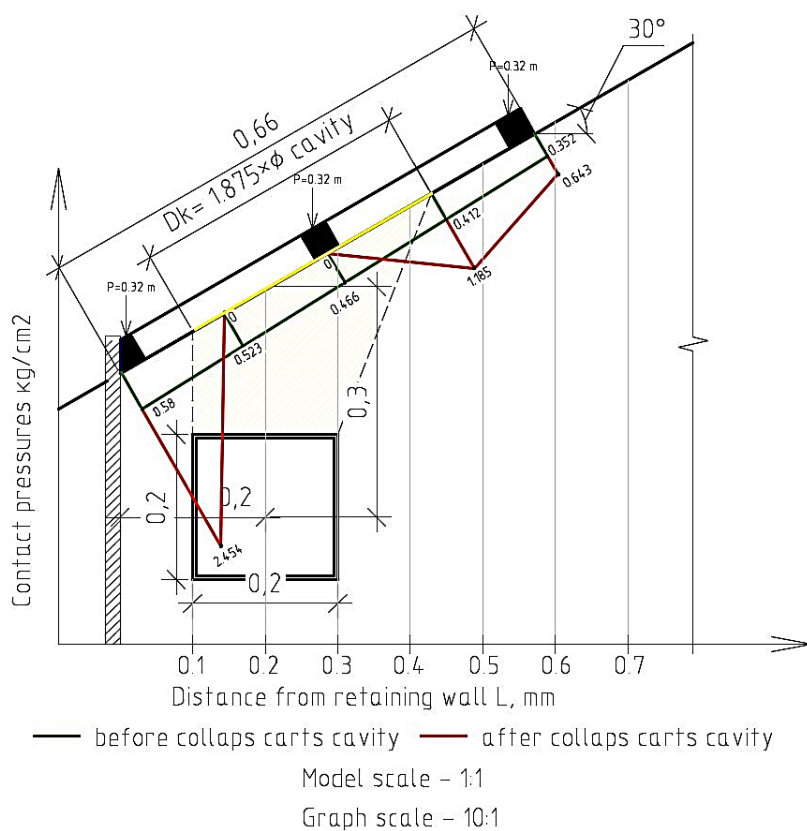


Рис. 3. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 2

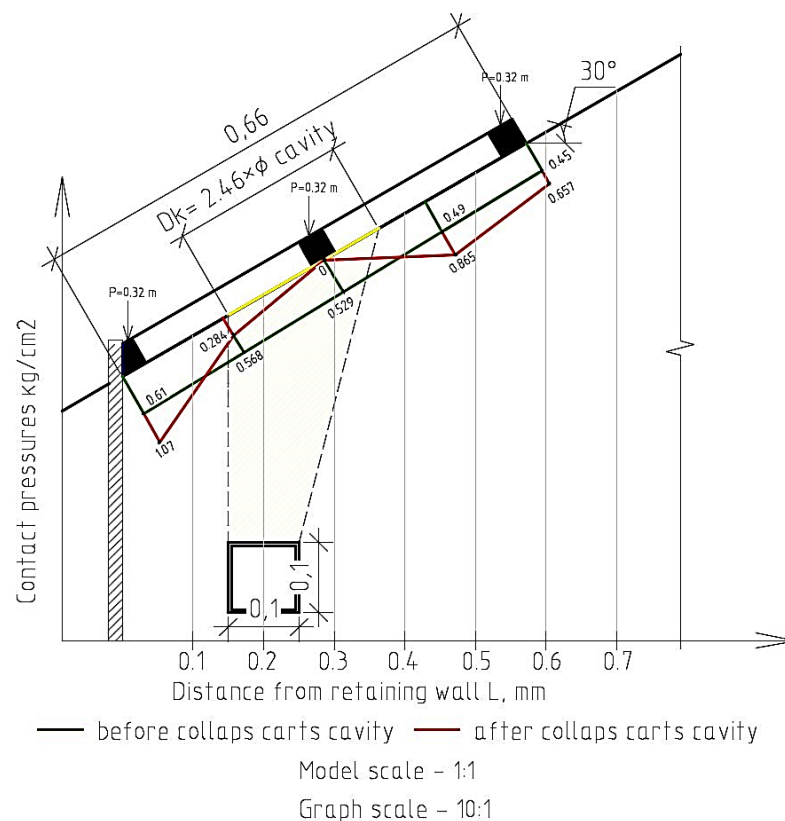


Рис. 4. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 3

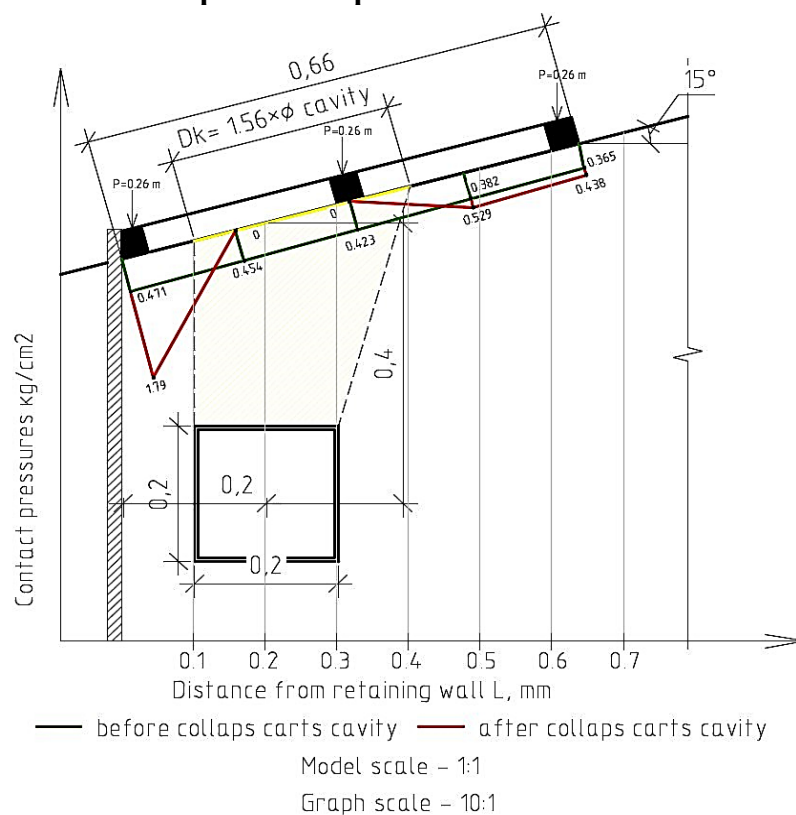


Рис. 5. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 4

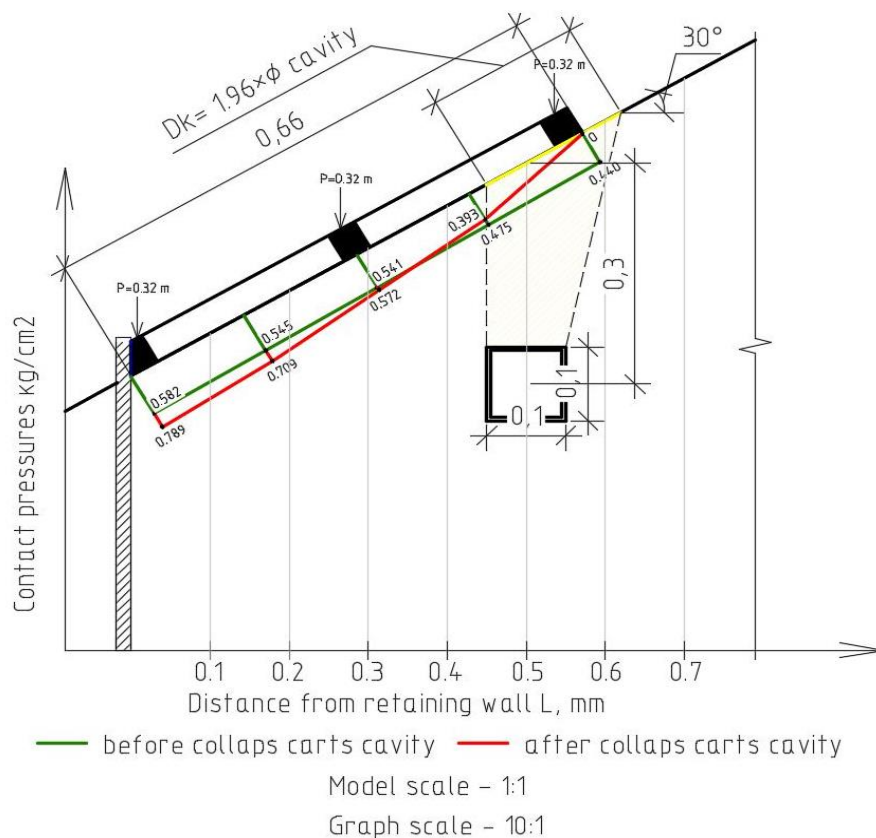


Рис. 6. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 5

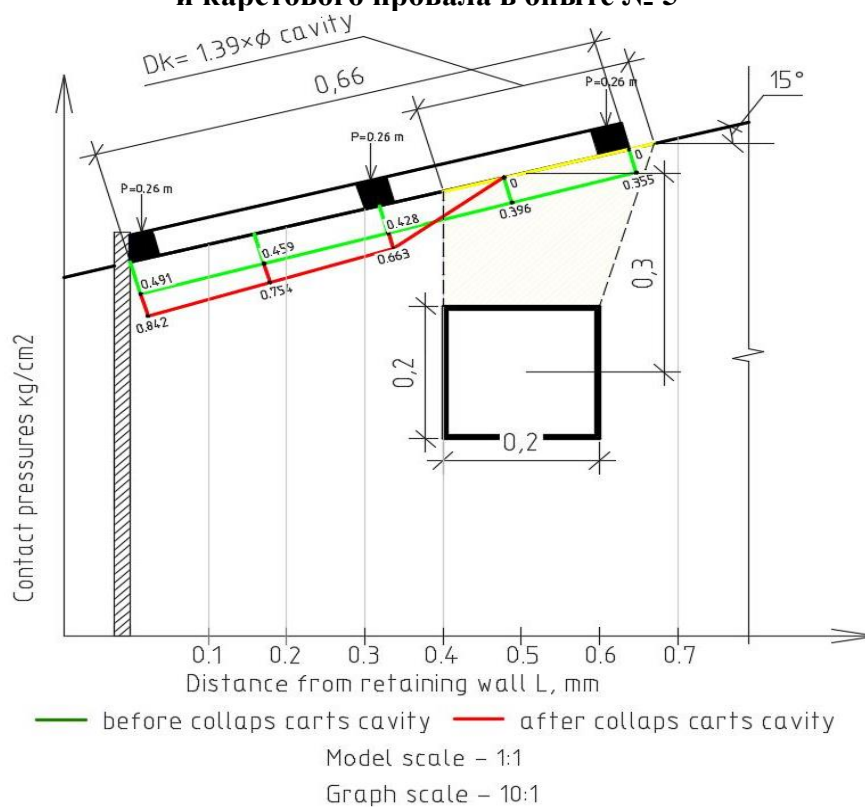


Рис. 7. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 6

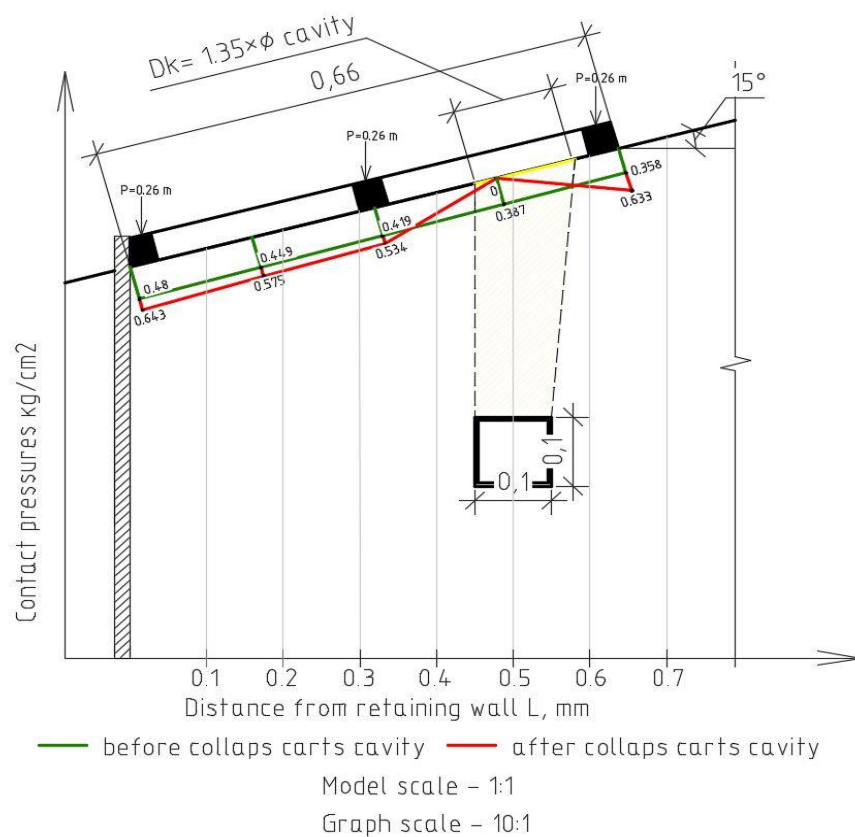


Рис. 8. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте №7

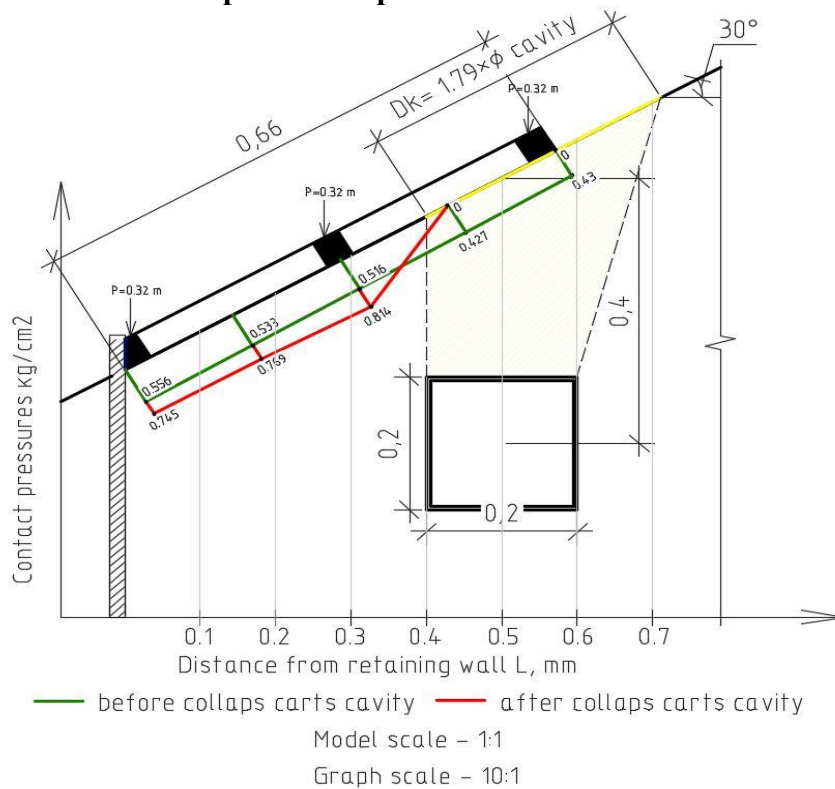


Рис. 9. Совмещенная схема изменения контактных напряжений и карстового провала в опыте № 8

Результаты проведенных модельных исследований позволили установить связь между отношением начального (возможного) диаметра карстовой полости D_0 , расстояния от удерживающей стены L , толщины покровной толщи H . С помощью предложенной функции можно определить вероятный диаметр карстового провала в наклонном основании при совместном взаимодействии с перекрестно-балочным фундаментом на этапе предпроектных работ.

$$Dk = D_0 \times (203,4(Htga)^3 - 85,821(Htga)^2 + 9,0455(Htga) + 0,464). \quad (1)$$

Величина достоверного приближения составляет $R^2 = 0,84$. Анализ полученных совмещенных схем изменения контактных напряжений и карстового провала всех восьми опытов позволил провести статистическую обработку результатов, с помощью которой были получены эмпирические коэффициенты к определению количественных параметров контактных напряжений под перекрестно-балочным фундаментом.

Значения трапецевидной эпюры σ_1 и σ_2 определяются по методике, изложенной в работах [19, 20] по формулам:

$$\sigma_1 = 2\sigma_{cp}^* \Delta K; \quad (2)$$

$$\sigma_2 = 2\sigma_{cp}^* (1 - \Delta K), \quad (3)$$

где ΔK — коэффициент определяющий соотношение граничных коэффициентов жесткости основания на этапах нагружения конструкции;

$$\Delta K = \frac{\frac{2}{3}\sigma_{cp}^* L^2 b - \sum_{i=1}^n G_i \cos \alpha x_i}{\frac{1}{3}P_{cp}^* L^2 b}, \quad (3)$$

где x_i — расстояние от точки приложения усилия G_i до нижней крайней точки фундаментной ленты, м.

Величину среднего давления σ_{cp}^* определяют из уравнения равновесия всех сил, действующих на балку, при проектировании их на местные координатные оси $OY\alpha$. Тогда

$$\sigma_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{L b} (\cos \alpha + \cos \alpha \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha \sin \alpha f_{тр}^6). \quad (4)$$

Так как полученные коэффициенты были определены на основании модельных исследований, то применяя их необходимо задаться граничными условиями, которые использовались при физическом моделировании:

1. Диапазон расположения карстовой полости L_R находится в пределах:

$$0,6 \frac{D_0}{2} \leq L_R \leq L_b. \quad (5)$$

2. Расчет применим для карстовых полостей в диапазоне:

$$3 \text{ м} \leq D_0 \leq 6 \text{ м}. \quad (6)$$

3. Расчетный отрезок продольной ленты принимается как равные два пролета по 6 м.

4. Для построения эпюры нормальных контактных напряжений ординаты рассчитываются в пяти расчетных отрезках продольной ленты перекрестно-балочного фундамента.

В табл. 2 предложены коэффициенты, применение которых позволит сократить трудоемкость расчетов изменения нормальных контактных напряжений на наклонном основании с вероятным образованием карста предложенной в работах [19, 20] на этапе предпроектных работ.

Таблица 2. Расчетные коэффициенты к определению ординат нормальных контактных напряжений после образования карстовых деформаций по типу провал на наклонном основании от 15° до 30°

Диаметр карстовой полости			
3 м		6 м	
K ₁	1,54	K ₁	2,77
K ₂	1,16	K ₂	0,77
K ₃	0,85	K ₃	0,78
K ₄	1,01	K ₄	1,06
K ₅	1,1	K ₅	0,75

Таким образом, применяя представленные в таблице 2 коэффициенты, полученные эмпирическим путем, можно существенно сократить трудоемкость при вычислении эпюры нормальных контактных напряжений в наклонном основании при образовании карстовых деформаций.

Заключение

С помощью статистического анализа данных, полученных опытным путём, удалось вывести полиномиальное уравнение. Оно позволяет рассчитать диаметр карстовой воронки в наклонном основании при взаимодействии с конструкциями перекрёстно-балочного фундамента. Также были предложены коэффициенты для определения перераспределённой эпюры нормальных контактных напряжений под конструкцией перекрёстно-балочного фундамента на наклонном основании в случае карстово-обвальных процессов.

По результатам проведенных исследований предложена упрощенная методика расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами.

Разработаны коэффициенты для расчёта для перекрёстно-балочного фундамента, которые позволяют сократить трудоемкость расчета при определении нормальных контактных напряжений в наклонном грунтовом основании после появления карстового провала. С помощью предложенных коэффициентов можно рассчитать и оценить возможность применения фундаментов мелкого заложения на этапе предпроектных работ.

С помощью математико-статистического анализа данных, полученных опытным путём, удалось вывести степенную функцию, которая позволяет рассчитать диаметр карстовой воронки в наклонном основании при взаимодействии с конструкциями перекрёстно-балочного фундамента.

Список источников

1. Аникеев, А. В. Оценка геологического риска на участке городского строительства / А. В. Аникеев, А. Л. Рагозин, В. Н. Селезнев // *Геоэкология*. – 2007. – № 6. – С. 547-560.
2. Леоненко, В. М. Определение параметров проектирования противокарстовой защиты в рамках геотехнической системы «карст- сооружение» / В. М. Леоненко, М. В. Леоненко, В. В. Толмачев // *Оценка и управление природными рисками: Материалы Всеросс. конф. «Риск-2006»*. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – С. 315-318.
3. Karst Landscapes in Russia. // *Karst management* / Ph. E. van Beynen (ed). Springer, 2011. Chapter 4. P. 75–102.
4. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in Collapse Risk Assessment of Building on Covered
5. Особенности инженерных изысканий на закарстованных территориях в пределах Крымского п-ова / Г. Н. Амеличев, Б. А. Вахрушев, Г. В. Самохин, С. В. Токарев // *Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях*. – Москва, 2023. – С. 72-92.
6. Вахрушев, Б. А. Районирование карста Крымского полуострова / Б. А. Вахрушев // *Speleology and Karstology*. – 2009. – № 3. – С. 39-46.
7. Барыкин, Б. Ю. Здания и сооружения на сложном рельефе: учебно-методическое пособие к проведению практических занятий, организации самостоятельной работы и выполнению расчетно-графических работ для студентов направления 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения / Б. Ю. Барыкин, А. Б. Барыкин, В. В. Морозов. – Симферополь, Институт «Академия строительства и архитектуры», 2022. – 74 с.
8. Aktürk, Ö., Drumm, E.C., Tutluoğlu, L., Akgün, H. Undrained stability of residual soil in karst // *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Geotechnical Special Publ. No. 183 / ASCE*, 2008. P. 223–232.
9. Newton, J.G. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States: U.S. Geological Survey Circular 968. Denver, 1986. 128 p.
10. Newton, J.G. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States: U.S. Geological Survey Circular 968. Denver, 1987. 54 p.
11. Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M. Sinkholes and subsidence. *Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer Praxis, 2005.
12. Zhou, W., Beck, B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications // *Environmental Geology*. 2008. Vol. 55. P. 837–851.
13. Roscoe, K.H. The influence of strains in soil mechanics // *Géotechnique*. 1970. Vol. 20. P. 129–170.
14. Salvati, R., Tharp, T.M., Capelli, G. Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region // *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology* / B.F. Beck, J.G. Herring (eds). Lisse: Swets & Zeitlinger, 2001. P. 163–167.

15. Tharp, T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Geotechnical Special Publ. No. 122 / ASCE, 2003. P. 110–123.
16. Аникеев, А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска / А. В. Аникеев. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
17. Саваренский, И. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / И. А. Саваренский, Н. А. Миронов // ПНИИИС Госстроя России. – М., 1995. – 167 с.
18. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия моделей перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при влиянии карстово-обвальных процессов / С. И. Евтушенко, Е. В. Зеленин, Б. Ю. Барыкин, А. Б. Барыкин // Construction and geotechnics. – 2024. – Т.15. – № 3. – С. 26-41.
19. Барыкин, А. Б. Модельные исследования деформаций оснований перекрестно-балочных фундаментов на склонах / А. Б. Барыкин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 3 (272). – С. 68-75.
20. Зеленин, Е. В. Экспериментально-теоретические исследования взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания с карстовой полостью: дис. ... канд. тех. наук / Е. В. Зеленин. – Москва, 2025. – 137 с.

© Зеленин Е. В., Барыкин А. Б. Барыкин Ю. Б., 2026