

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-226- 235



Оригинальная статья /Original article

Об одном варианте физических зависимостей при моделировании развития линии отрыва здания от фундамента при выравнивании крена домкратами
Л.Н. Панасюк¹, М.В. Зотов^{1,2}, А.А. Фириченко¹, М.А. Магомедов³

¹Донской государственный технический университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²ООО НПФ «Интербиотех»,

²344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Портовая, 80/2, Россия,

³Дагестанский государственный технический университет,

³367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка уточненных методов расчета сооружений на деформируемых основаниях. Для достижения поставленной цели рассматривается задача о построении уточненных зависимостей между напряжениями и деформациями в физически нелинейном материале с учетом образования трещин. **Метод.** Использование уточненных механико-математических моделей позволит не только получить более достоверные результаты работы системы «сооружение – фундамент – деформируемое основание», но и корректно решить инженерную проблему проектирования усиления и процесса выравнивания. **Результат.** Для проектирования усиления цокольной и верхней части сооружения выполнено механико-математическое моделирование процесса образования линии отрыва при увеличении усилий в домкратах на основе физически нелинейной постановки задачи и применения уточненных физических зависимостей для тонкого слоя, в котором имеется адгезия между верхним строением и фундаментом. Обоснованы требования к механической модели процесса отрыва здания от фундамента при увеличении усилий на домкраты. **Вывод.** Сформулированы основные физические зависимости, определяющие процесс образования линии отрыва в слое адгезии. Приведенные зависимости позволяют учитывать конструктивную нелинейность, связанную с изменением расчетной схемы при постепенном отрыве здания от фундамента.

Ключевые слова: физическая нелинейность, трещинообразование, нормальное напряжение, касательное напряжение, компоненты деформаций, теория прочности, крены, разрушение, выравнивание

Для цитирования: Л.Н. Панасюк, М.В. Зотов, А.А. Фириченко, М.А. Магомедов. Об одном варианте физических зависимостей при моделировании развития линии отрыва здания от фундамента при выравнивании крена домкратами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):226-235. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-226-235

On one variant of physical dependencies in modeling the development of the line of separation of a building from the foundation when leveling the tilt with jacks
L.N. Panasyuk¹, M.V. Zotov^{1,2}, A.A. Firichenko¹, M.A. Magomedov³

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

²LLC NPF "Interbiotech",

²80/2 Portovaya St., Rostov-on-Don 344000, Russia,

³Daghestan State Technical University,

³70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop refined methods for calculating structures on deformable foundations. To achieve this objective, the problem of constructing refined dependencies between stresses and strains in a physically nonlinear material taking into account crack formation is considered. **Method.** The use of refined mechanical and mathematical models will allow not only to obtain more reliable results of the operation of the "structure - foundation - deformable base" system, but also to correctly solve the engineering problem of designing reinforcement and the leveling process. **Result.** To design the reinforcement of the basement and upper parts of the structure, mechanical and mathematical modeling of the process of tear-off line formation with increasing forces in jacks was performed based on a physically nonlinear statement of the problem and the use of refined physical dependencies for a thin layer in which there is adhesion between the superstructure and the foundation. The requirements for a mechanical model of the process of detaching a building from the foundation with increasing forces on jacks are substantiated. **Conclusion.** The main physical dependencies that determine the process of formation of the tear line in the adhesion layer are formulated, and also take into account the structural nonlinearity associated with the change in the calculation scheme during the gradual tearing of the building from the foundation.

Keywords: physical nonlinearity, cracking, normal stress, tangential stress, deformation components, strength theory, rolls, fracture, alignment

For citation: L.N. Panasyuk, M.V. Zotov, A.A. Firichenko, M.A. Magomedov. On one variant of physical dependencies in modeling the development of the line of separation of a building from the foundation when leveling the tilt with jacks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):226-235. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-226-235

Введение. На многоэтажные здания в течение жизненного цикла действует ряд природных факторов, вызывающих неравномерные осадки основания. В свою очередь, здания также испытывают такие неравномерные деформации, как прогибы, крены и скручивание [1-18]. На возникновение неравномерных деформаций влияет множество различных факторов, которые определяются спектром объективных и субъективных факторов. Это могут быть грубые ошибки в процессе выполнения проектирования и изыскательских работ, ошибки при строительстве или эксплуатации здания. Однако применительно к конкретной специфике нового объекта определенные факторы могут оказать существенное влияние либо непосредственно, либо опосредованно [5-6].

Постановка задачи. На территории России и за рубежом, имеется множество зданий и сооружений, испытывающих значительные неравномерные деформации. Одним из методов восстановления эксплуатационной надежности является подъем просевшей части здания системой домкратов. Основными причинами кренов здания является неверный учет работы основания. Например, неравномерные осадки грунтового основания, оползневые процессы и т.п. Так, в ФРГ в земле Саарлэнд основная причина значительных неравномерных осадок – шахтные подработки. На Юге РФ одной из основных причин – просадочные грунты (рис. 1).



Рис. 1. Примеры кренов зданий от неравномерных осадок и оползневых процессов
Fig. 1. Examples of building tilts due to uneven settlement and landslide processes

Одним из методов, хорошо зарекомендовавшим в практике выравнивания зданий, является неравномерный подъем системой домкратов, установленных между фундаментом и цоколем здания. При подъеме здания наиболее ответственным является начальный момент, при котором на домкраты подают наибольшие усилия для преодоления связей между зданием и фундаментом – рис. 2.



Рис. 2. Варианты усиления и домкратных узлов

Fig. 2. Options for reinforcement and jacking units

Здесь одним из ответственных моментов является этап начального отрыва несущих конструкций здания от фундамента. При этом наблюдается максимальные усилия в домкратах, превышающие усилия после отрыва (в процессе устранения крена здания) до 40%. Это объясняется двумя факторами – необходимостью преодоления адгезии между стеновыми панелями и фундаментом и необходимостью обеспечения определенного линейного и углового ускорения для достижения определенных скоростей подъема. Опыт выравнивания зданий показал, что основной вклад в увеличение начальных усилий вносит адгезия. Это объясняется тем, что линейные скорости отдельных точек здания при выравнивании сравнительно низкие – порядка одного миллиметра в минуту, и они могут быть достигнуты за продолжительный интервал – несколько минут.

Отрыв здания от фундамента характеризуется непрерывным изменением расчетной схемы за счет постепенного выключения из работы отдельных связей между несущими цокольными конструкциями и фундаментом (рис. 3).



Рис. 3. Образование линии отрыва и ее развитие

Fig. 3. Formation of the tear line and its development

При этом цокольные конструкции ослаблены технологическими домкратными нишами. Как правило, в железобетонных цокольных панелях разрезается нижняя несущая арматура. Таким образом, здание работает по нехарактерной для него схеме с нарушенными несущими конструкциями и постепенным (достаточно быстрым) изменением условий опирания (от сплошного до дискретного на домкратах).

Для проектирования усиления цокольной и верхней части сооружения требуется выполнить механико-математическое моделирование процесса образования линии отрыва при увеличении усилий в домкратах. Для этого требуется использовать физически нелинейную постановку задачи и применять уточненные физические зависимости для тонкого слоя, в котором имеется адгезия между верхним строением и фундаментом.

Методы исследования. Важной задачей современной строительной механики является разработка уточненных методов расчета сооружений на деформируемых основаниях. Использование уточненных механико-математических моделей позволит не только

получить более достоверные результаты работы системы «сооружение – фундамент – деформируемое основание», но и корректно решить инженерную проблему проектирования усиления и процесса выравнивания. Разработка качественной механико-математической модели, описывающей работу различных объектов, невозможной без учета различных типов нелинейности. С.П. Тимошенко дополнительно предложил рассматривать конструктивную нелинейность [12]. В частности, необходимость учета физической, геометрической и конструктивной нелинейности возникает при моделировании систем, которые подвержены изменению расчетной схемы сооружения на разных этапах эволюции. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что даже при малых перемещениях в поведении грунтового основания зависимости между напряжениями и деформациями имеют отклонения от линейной зависимости. Такого рода нелинейности при описании математических моделей поведения грунтовой среды учитываются нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями $\sigma \sim \varepsilon$.

Геометрическая нелинейность обуславливается значительными перемещениями и деформациями при динамических воздействиях. В процессе деформирования грунтового основания происходит разрушение старых и возникновение новых структурных связей, такого рода явления обуславливаются конструктивной нелинейностью.

В процессе выравнивания здания, при увеличении нагрузки на домкраты, отдельные участки в адгезионном слое, или в окрестности последнего, достигают предельного состояния. Нарушаются внутренние связи, вследствие чего увеличиваются взаимные перемещения между фундаментом и стенами здания. При построении модели требуется выполнить учет больших взаимных перемещений, описать достижение предельного равновесия материала в отдельных зонах и учесть изменение расчетной схемы вследствие конечного взаимного смещения фрагментов.

Гипотезы наступления предельного состояния в некотором малом объеме материала достаточно развиты, однако актуальным остается вопрос моделирования поведения объема при дальнейшем росте деформаций. Одной из постановок является учет образования трещин в процессе деформации расчетной области [13-17]. Выделение общих связей между напряжениями и деформациями в физически нелинейном материале с трещинами представляет собой сложную задачу. Появление трещин в процессе нагружения сооружения связано с разрушением материала, поэтому для получения приближенных зависимостей $\sigma \sim \varepsilon$ необходимо привлекать подходящую теорию прочности. Будем предполагать, что в материале существуют или могут возникнуть в процессе нагружения сооружения микротрещины, которые в состоянии близком к разрушению объединяются и формируют микротрещины.

Таким образом, условно выделены два уровня рассмотрения состояния материала: с микро- и макро трещинами. В обоих случаях предполагается, что деформация есть осреднённая характеристика и определяется некоторыми средним значением по объему. Наличие микротрещин в материале учитывается прочностными характеристиками $k(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n)$, $G(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_j)$ магистральных трещин, привлекается подходящая феноменологическая теория прочности. Для выявления начала и характера локального разрушения материала можно использовать широко известную теорию прочности Надаи для материалов, характеризующихся разным сопротивлением растяжению и сжатию. Согласно которой уравнение предельной поверхности записывается в виде $\tau_{окт} = f(\sigma_{окт}, \mu_\sigma)$

Область прочного сопротивления материала находится внутри предельной поверхности:

$$\tau \leq f(\sigma_{окт}, \mu_\sigma) \quad (1)$$

$\sigma_{окт}(\tau_{окт})$ – нормальное (касательное) октаэдрическое напряжение; μ_σ – параметр Надаи-Лоде для напряжений.

Хотя феноменологический критерий разрушения (1) не может предсказать физическую картину процесса, но как показано в [12] имеется возможность определить характер разрушения. Для хрупко-пластичных материалов характерны два вида разрушения: от отрыва и от сдвига по опасным поверхностям скольжения. Линейная аппроксимация предельной зависимости (1) позволила выделить Филоненко-Бородичу М.М. начало разрушения от сдвига:

$$\left| \frac{d\tau_{okm}}{d\sigma_{okm}} \right| < \sqrt{\frac{2(3 + \mu^2 \sigma)}{3 - \mu \sigma}} \quad (2)$$

и от отрыва (при отрыве (2) нарушается). При отрыве предполагается, что трещины образуются по главным площадкам, когда главные нормальные напряжения превысят так называемое усилие трещинообразования.

В реальном материале наличие трещин обуславливает большое число обобщенных координат, фактическое состояние которых невозможно измерить, и поэтому из всего многообразия факторов, сопутствующих такому механическому явлению, как разрушение, выбран один – принимается во внимание только статистический фактор. По берегу трещины полагается, что $\sigma_n = \tau = 0$ (σ_n – нормальное напряжение, перпендикулярное берегу трещины, τ – касательное напряжение по поверхности разрыва). Условие $\tau = 0$ в соответствии с принятой гипотезой об образовании трещин по главным площадкам выполняется автоматически.

В дальнейшем изложении предполагается, что в материале при любом напряженном состоянии возникают малые деформации и справедливы следующие соотношения сплошной среды: уравнения равновесия в напряжениях; зависимости между компонентами деформаций и компонентами перемещений; условие сплошности Сен-Венана в растрескавшемся материале выполняется для некоторых осредненных деформаций, т.е. предполагается, что материал в процессе разрушения разрыхляется и не имеет разрывов.

Физические зависимости определим в соответствии с принятыми гипотезами об образовании трещин. Для пространственной задачи в точках среды при разрушении от отрыва могут возникнуть следующие ситуации.

1. Пусть в окрестности некоторой точки произошло разрушение от отрыва. Первая появившаяся трещина расположена на площадке, перпендикулярной к наибольшему главному напряжению σ_1 . После образования трещины материал в окрестности рассматриваемой точки перестанет работать на растяжение по направлению первой главной оси, т.е. можно положить $\sigma_1 = 0$, и физические зависимости в главных осях запишутся так:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{3k - 2G}{3k + 1G}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (4)$$

Подставим (4) в (3), получим:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4g(3k + g)}{3k + 4g} & \frac{2g + (3k - 2g)}{3k + 4g} \\ \frac{2g(3k - 2g)}{3k + 4g} & \frac{4g(3k + 4g)}{3k + 4g} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\sigma = D_{01} \varepsilon \quad (5a)$$

2. Две пересекающиеся трещины при разрушении от отрыва могут появиться либо одновременно, если $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ либо последовательно, если $\sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3$ или $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$. В этом случае материал в окрестности рассматриваемой точки работает только по одной из главных осей, физические зависимости на главных осях имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Из уравнений (6) имеем:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{3k - g}{2(3k + g)} \varepsilon_3$$

Исключая ε_1 и ε_2 из уравнения (6), получим:

$$\delta_3 = \frac{9kg}{3k + g} \varepsilon_3 \quad (7)$$

3. Для трех взаимно перпендикулярных пересекающихся трещин при отрыве все главные напряжения полагаются равными нулю, и физические зависимости принимаются в виде:

$$\sigma_j = 0 \cdot \varepsilon_j \quad (8)$$

Где $\sigma_j^T = \{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3\}$; $\varepsilon_j^T = \{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3\}$

Положение главных осей 1,2,3 относительно произвольной декартовой системы координат x,y,z определяется с помощью направляющих косинусов:

	1	2	3
x	L ₁	M ₁	N ₁
y	L ₂	M ₂	N ₂
z	L ₃	M ₃	N ₃

Связь между напряжениями и деформациями, определенная в главных осях для среды с трещинами формулами (5 - 8), может быть записана в произвольной декартовой системе координат x, y, z, с помощью известных формул преобразования.

$$\sigma = L^T \cdot \sigma_j$$

$$\varepsilon_j = L \cdot \varepsilon$$

$$L = \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^2 & L_2^2 & L_3^2 & L_1 L_2 & L_1 L_3 & L_2 L_3 \\ M_1^2 & M_2^2 & M_3^2 & M_1 M_2 & M_1 M_3 & M_2 M_3 \\ N_1^2 & N_2^2 & N_3^2 & N_1 N_2 & N_1 N_3 & N_2 N_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Принимая во внимание (9), зависимости (5), (7), (8) запишем в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11}^k & B_{12}^k & B_{13}^k & B_{14}^k & B_{15}^k & B_{16}^k \\ & B_{22}^k & B_{23}^k & B_{24}^k & B_{25}^k & B_{26}^k \\ & & B_{33}^k & B_{34}^k & B_{35}^k & B_{36}^k \\ & & & B_{44}^k & B_{45}^k & B_{46}^k \\ & & & & B_{55}^k & B_{56}^k \\ & & & & & B_{66}^k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} \text{ или } \sigma = B^k \varepsilon \quad (10)$$

При K=1 (через точку среды проходит одна трещина) элементы матрицы. B₁ определяется по формулам:

$$B_{11} = a_1(m_1^4 + n_1^4) + 2a_2 n_1^2 m_1^2;$$

$$\begin{aligned}
 B_{12} &= a_1(n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) + a_2(m_1^2 n_1^2 + m_2^2 n_1^2); \\
 B_{13} &= a_1(n_1^2 n_3^2 + m_1^2 m_3^2) + a_2(m_1^2 n_3^2 + m_3^2 n_1^2); \\
 B_{14} &= a_1(n_1^3 n_2 + m_1^3 m_2) + a_2 n_1 m_1 (m_1 n_2 + n_1 m_2); \\
 B_{15} &= a_1(n_1^3 n_3 + m_1^3 m_3) + a_2 n_1 m_1 (n_3 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{16} &= a_1(n_1^2 n_2 n_3 + m_1^2 m_2 m_3) + a_2(m_1^2 n_2 n_3 + m_2 m_3 n_1^2); \\
 B_{22} &= a_1(n_2^4 + m_2^4) + 2a_2 n_2^2 m_2^2; \\
 B_{23} &= a_1(n_2^2 n_3^2 + m_2^2 m_3^2) + a_2(m_1^2 n_3^2 + n_2^2 m_3^2); \\
 B_{24} &= a_1(n_1 n_2^3 + m_1 m_2^3) + a_2(n_1 n_2 m_1^2 + m_1 m_2 n_2^2); \\
 B_{25} &= a_1(n_1 n_2^2 n_3 + m_1 m_2^2 m_3) + a_2(n_1 n_3 m_2^2 + m_1 n_2^2 m_3); \\
 B_{26} &= a_1(n_2^3 n_3 + m_2^3 m_3) + a_2(n_2 n_3 m_1^2 + n_2^2 m_2 m_3); \\
 B_{33} &= a_1(n_3^4 + m_3^4) + 2a_2 n_3^2 m_3^2; \\
 B_{34} &= a_1(n_1 n_3^3 + m_1 m_3^3) + a_2(n_1 n_2 m_3^2 + m_1 m_3 n_3^2); \\
 B_{35} &= a_1(n_1 n_2 n_3^2 + m_1 m_2 m_3^2) + a_2(n_1 n_2 m_3^2 + m_1 m_2 m_3^2); \\
 B_{36} &= a_1(n_2 n_3^3 + m_2 m_3^3) + a_2(n_2 n_3 m_3^2 + m_2 m_3 m_3^2); \\
 B_{44} &= a_1(n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) + 2a_2 m_1 m_2 n_1 n_2; \\
 B_{45} &= a_1(n_1^2 n_2 n_3 + m_1^2 m_2 m_3) + a_2(n_1 n_3 m_1 m_2 + n_1 n_2 m_1 m_3); \\
 B_{46} &= a_1(n_1 n_2^2 n_3 + m_1 m_2^2 m_3) + a_2 n_2 m_2 (n_3 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{55} &= a_1(n_1^2 n_3^2 + m_1^2 m_3^2) 2a_2 n_1 n_3 m_1 m_3; \\
 B_{56} &= a_1(n_1 n_2 n_3^2 + m_1 m_2 m_3^2) + a_2 n_2 m_3 (n_2 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{66} &= a_1(n_2^2 n_3^2 + m_1^2 m_3^2) + 2a_2 n_2 n_3 m_2 m_3; \\
 a_1 &= \frac{4g(3k+g)}{3k+4g}; a_2 = \frac{2g(3k-2g)}{3k+4g}
 \end{aligned}$$

При $K=2$ (через точку среды проходят две ортогональные трещины).

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= E^* \cdot N_1^4; B_{12} = E^* N_1^2 N_2^2; B_{13} = E^* N_1^2 N_3^2; B_{14} = E^* N_1^3 N_2; B_{15} = E^* N_1^2 N_3; \\
 B_{16} &= E^* N_1^2 N_2 N_3; B_{22} = E^* N_2^4; B_{23} = E^* N_2^2 N_3^2; B_{24} = E^* N_1 N_2^3; B_{25} = E^* N_1 N_2^2 N_3; \\
 B_{26} &= E^* N_2^3 N_3; B_{33} = E^* N_3^4; B_{34} = E^* N_1 N_2 N_3^2; B_{35} = E^* N_1 N_3^3; B_{36} = E^* N_2 N_3^3; \\
 B_{44} &= E^* N_1^2 N_2^2; B_{45} = E^* N_1^2 N_2 N_3; B_{46} = E^* N_1 N_2^2 N_3; B_{55} = E^* N_1^2 N_3^2 \\
 B_{56} &= E^* N_1 N_2 N_3^2; B_{66} = E^* N_2^2 N_3^2; \\
 E^* &= \frac{9GK}{3K+G}
 \end{aligned}$$

При $K=3$ (полное исчерпание несущей способности материала в точке). $B_j = 0$.

К зависимостям (10) при $K=1,2,3$ необходимо добавить (11), т.е. физические управления для материала без трещин, в дальнейшем будем полагать, что $B = D_0$

При разрушении от сдвига равно возможно появление в окрестности точки двух не ортогональных трещин, возникающих по площадкам, которые проходят через ось среднего по величине главного напряжения. В этом случае полагаем, что скольжение происходит по идеально гладкой поверхности и поэтому после выявления подобного типа разрушения полагаем $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ и физический закон принимается в форме (10) при $K=2$.

Итак, при деформировании сооружения с учетом разрушения выше были выделены четыре типа напряженных состояний. Охарактеризовать их можно следующим образом. Первый тип, материал не разрушается, в окрестности точки возникает трехосное напряженное состояние. Второй тип, материал в окрестности точки имеет одну трещину - двухосное напряженное состояние. Третий тип, материал разрушился от отрыва или сдвига, в окрестности точки имеются две пересекающиеся трещины - одноосное напряженное состояние. Для четвертого типа в окрестности точки наступает полное исчерпание несущей способности материала, полное разрушение. Из трехосного напряженного состояния I, могут возникнуть двухосное или одноосное напряженное состояние путем разрушения материала от отрыва или сдвига. Из состояния II можем возникнуть состояние III от отрыва и состояние IV при разрушении от сдвига. Из состояния III при любом характере разрушения возникает состояние IV, соответствующие полностью разрушенному материалу в окрестности точки.

Обсуждение результатов. В заключении отметим, что полученные приближенные физические зависимости для материала с трещинами имеют анизотропный характер. При этом направление оси анизотропии зависит от положения главных осей и поэтому меняется от точки к точке. Нелинейность связи $\sigma \sim \varepsilon$ обусловлена не только зависимостью физических характеристик $G(\varepsilon_j \cdot \varepsilon_0)$, $K(\varepsilon_j \cdot \varepsilon_0)$ от инвариантов деформации, но и направляющие косинусы L_j, M_j, N_j , также являются функциями компонент вектора деформации:

$$L_j = \Delta L_j \lambda_j; M_j = \Delta M_j \lambda_j; N_j = \Delta N_j \lambda_j; \quad (11)$$

В формулах (11):

$$\Delta L_j = \frac{1}{4} \gamma_{xy} \gamma_{xz} - \frac{1}{2} \gamma_{xz} (\varepsilon_y - \varepsilon_j);$$

$$\Delta M_j = \frac{1}{4} \gamma_{xy} \gamma_{xz} - \frac{1}{2} \gamma_{yz} (\varepsilon_x - \varepsilon_j);$$

$$\Delta N_j = (\varepsilon_x - \varepsilon_j)(\varepsilon_y - \varepsilon_j) - \frac{1}{4} \gamma_{xy}^2$$

$$\lambda_j = 1 \cdot (\Delta^2 L_j + \Delta^2 M_j + \Delta^2 N_j)^{\frac{1}{2}}, (j = 1, 2, 3)$$

На рис. 4 показан пример использования программного комплекса ПОЛЮС при моделировании процесса выравнивания здания. Рассмотрен начальный вариант модели, в котором не учитывалось усиление стен. Показан фрагмент стены на одном из этапов увеличения нагрузки на домкраты (60% усилия). Отчетливо видно образование линии отрыва по нижнему образцу стен, а также образование зон разрушения стены в окрестностях оконных и дверных проемов, что позволяет уточнить инженерные решения при усилении здания.

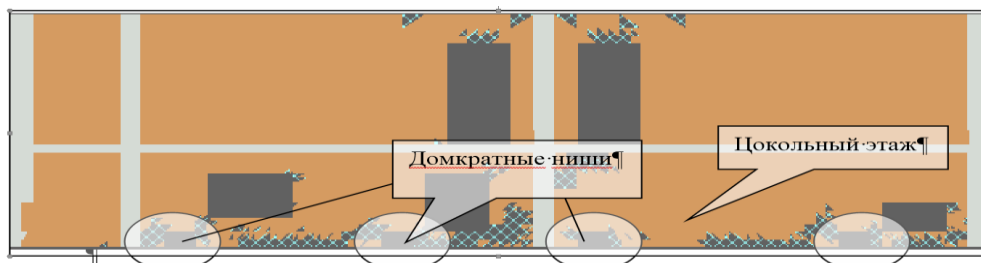


Рис. 4. Пример поэтапного образования линии отрыва и зон разрушения в стенах на этапе подъёма здания (фрагмент)

Fig. 4. An example of the stage-by-stage formation of a tear line and destruction zones in walls during the building's rise (fragment)

Вывод. Обоснованы требования к механической модели, моделирующей процесс отрыва здания от фундамента при увеличении усилий на домкраты.

Сформулированы основные физические зависимости, определяющие процесс образования линии отрыва в слое адгезии. Также возможен учет разрушения в фрагментах стен над домкратными нишами. Приведенные зависимости позволяют учитывать конструктивную нелинейность, связанную с изменением расчетной схемы при постепенном отрыве здания от фундамента.

Библиографический список:

1. Махвиладзе Л.С., Шерадзе Г., Зотов В.Д., Болотов Ю.К. Восстановление эксплуатационной надежности аварийных зданий. – «Инженерные проблемы Грузии: состояние и перспективы». – Тбилиси: Инженерная академия Грузии, 1998 – С.121-123.
2. Лобов О.И., Гапеев В.И., Зотов В.Д., Болотов Ю.К., Зотов М.В. Подъем и выравнивание аварийных зданий. «Промышленное и гражданское строительство». – М., 1999.- С.14-16.
3. Зотов М.В., Кутасов И.А., Скибин М.Г., Фириченко А.А. Технологические особенности устранения сверхнормативных кренов заблокированных зданий различной этажности.- «Основания, фундаменты и механика грунтов».-М., 2015.-С.11-14
4. Панасюк Л.Н., Труфанова Е.В. Применение программного комплекса "Клен-МКД" для расчетов в нелинейной постановке. Актуальные проблемы науки и техники. Ростов-на-Дону, 2024.-953-954с.
5. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Чубка Ю.Ш. Моделирование работы подкрепленных оползневых склонов методом конечных элементов //Инженерный Вестник Дона.-2016, № 3. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3733>
6. Панасюк Л.Н., Зотова Е.В., Хо Чантхо, Акопян В.Ф. Определение влияния вспомогательного ростверка на несущую способность свай усиления цокольного здания с учетом неравномерной осадки в г. Белово Кемеровской области.Инженерный вестник Дона, Ростов-на-Дону, 2013, № 2, С. 131
7. Пшеничкина В.А., Гордеев С.С., Иванов М.А. Мониторинг зданий, риски, безопасность строительных объектов, мониторинг строительных конструкций.-Материалы международной научно-практической конференции «Малозэтажное строительство». Волгоград: ВГАСУ, 2009. 484 с.
8. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Чубка Ю.Ш., Пошев А.У-Б. Моделирование работы оползневых склонов при динамическом воздействии // Инженерный Вестник Дона. 2018. № 2 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4901>
9. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Савельева Н.А., Чубка Ю.Ш. Динамическая реакция в системе "дорожная конструкция - оползневой склон" от движения транспорта//Инженерный Вестник Дона . 2018. № 4 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5376>
10. Панасюк Л.Н., Войтов А.А. Оптимальное моделирование строительных конструкций// Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2022. С. 284-285.
11. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction // MATEC «Web of Conferences» 2017
12. Panasuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in case of increased seismic intensity in specific zones // Matec Web of Conferences. 2017 №106. DOI: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
13. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 650 с.
14. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала. М.: Госстройиздат. 1954. 129 с.
15. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н., Фахми Загер. О методе предельного равновесия. Ростов н/Д.: РИСИ. Деп в ВИНТИ 07.06.92. №1838-В92. 1992. 21 с.
16. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н., А.А.Аль-Тахиш. Определение предельных нагрузок для неоднородных вязкоупругопластических рам. Ростов-на-Дону. РИСИ. Деп в ВИНТИ №1169-В93. 1993. 21с.
17. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. К.: Наукова думка, 1969. 211 с.
18. Филоненко-Бородич М.М. Механические теории прочности. М.: изд. МГУ, 1961. 91 с.
19. Панасюк Л.Н. О построении явных безусловно устойчивых схем прямого интегрирования задачи динамики сооружений// Известия вузов. Строительство, 1995. № 10, С. 35-40.

References:

1. Makhviladze L.S., Sheradze G., Zotov V.D., Bolotov Yu.K. Restoration of operational reliability of emergency buildings. Engineering problems of Georgia: status and prospects. Tbilisi: Engineering Academy of Georgia, 1998;121-123.
2. Lobov O.I., Gapeev V.I., Zotov V.D., Bolotov Yu.K., Zotov M.V. Lifting and leveling emergency buildings. Industrial and civil construction. Moscow., 1999;14-16. (In Russ)

3. Zotov M.V., Kutasov I.A., Skibin M.G., Firichenko A.A. Technological features of eliminating excessive tilts of semi-detached buildings of different number of storeys. Foundations, foundations and soil mechanics. Moscow, 2015;11-14(In Russ)
4. Panasyuk L.N., Trufanova E.V. Application of the software package "Klen-MKD" for calculations in a nonlinear formulation. Actual problems of science and technology. Rostov-on-Don, 2024;953-954(In Russ)
5. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Chubka Yu.Sh. Modeling the work of reinforced landslide slopes by the finite element method. *Engineering Bulletin of the Don*. 2016;3. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3733>(In Russ)
6. Panasyuk L.N., Zotova E.V., Ho Chantho, Akopyan V.F. Determining the influence of an auxiliary grillage on the bearing capacity of a pile for reinforcing a basement building, taking into account uneven settlement in Belovo, Kemerovo Region. *Engineering Bulletin of the Don*, Rostov-on-Don, 2013; 2:131(In Russ)
7. Pshenichkina V.A., Gordeev S.S., Ivanov M.A. Monitoring of buildings, risks, safety of construction projects, monitoring of building structures. Proceedings of the international scientific and practical conference "Low-rise construction". Volgograd: VSUACE, 2009;484(In Russ)
8. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Chubka Yu.Sh., Poshev A.U-B. Modeling the work of landslide slopes under dynamic impact. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018; 2 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4901>(In Russ)
9. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Savelyeva N.A., Chubka Yu.Sh. Dynamic response in the system "road structure - landslide slope" from traffic. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018;4 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5376> (In Russ)
10. Panasyuk L.N., Voitov A.A. Optimal modeling of building structures. Rostov-on-Don.: DSTU, 2022; 284-285. (In Russ)
11. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction. MATEC «Web of Conferences» 2017
12. Panasuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in the case of increased seismic intensity in specific zones. Matec Web of Conferences. 2017 № 106. DOI: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
13. Rabotnov Yu.N. Mechanics of a deformable solid body. Moscow: Nauka, 1979; 650. (In Russ)
14. Rzhantsyn A.R. Calculation of structures taking into account the plastic properties of the material. Moscow: Gosstroyizdat. 1954;129. (In Russ)
15. Vasilkov G.V., Panasyuk L.N., Fahmi Zager. On the limit equilibrium method. Rostov n. D: RISI. Dep in VINI-TI 07.06.92. No. 1838-B92. 1992;21. (In Russ)
16. Vasilkov G.V., Panasyuk L.N., A.A. Al-Takhish. Determination of ultimate loads for heterogeneous viscoelastic-plastic frames. Rostov-on-Don: RISI. Dep in VINITI No. 1169-B93. 1993; 21. (In Russ)
17. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Resistance of materials to deformation and failure under complex stress state. K.: Naukova Dumka, 1969; 211. (In Russ)
18. Filonenko-Borodich M.M. Mechanical theories of strength. M.: Moscow State University Press, 1961;91. (In Russ)
19. Panasyuk L.N. On the construction of explicit unconditionally stable schemes for direct integration of the problem of the dynamics of structures. *News of universities. Construction*, 1995; 10: 35-40. (In Russ)

Сведения об авторах:

Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика и теория сооружений», Panasjuk.leonid@gmail.com

Зотов Михаил Витальевич, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО НПФ «Интербиотех»; ppointerbiotech@mail.ru

Фириченко Андрей Александрович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений», Магомедов Марсель Айдемирович, аспирант кафедры «Строительная механика»; marsmag05@ya.ru. ORCID 0000-0001-5517-919X;

Information about authors:

Leonid N. Panasiuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Head of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; Panasjuk.leonid@gmail.com

Mikhail V. Zotov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., General Director of NPF Interbiotech LLC; ppointerbiotech@mail.ru

Andrey A. Firichenko, Postgraduate, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures

Marcel A. Magomedov, Postgraduate, Department of Structural Mechanics; marsmag05@ya.ru. ORCID 0000-0001-5517-919X;

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 11.09.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.10.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 06.11.2024.