

Л.В. Янковский

Пермский государственный технический университет

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ГЕОСРЕДЫ ОСНОВАНИЯ, УСИЛЕННОГО ГЕОИМПЛАНТАТНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ

Описана модель геосреды для расчета системы основание–геоимплантат–фундамент. Модель использована для численного исследования напряженно-деформированного состояния основания ленточных фундаментов. Решение плоской задачи для геоимплантатной конструкции проведено в упругопластической постановке.

Ключевые слова: *закрепление оснований, геоимплантат, фундамент, реконструкция, плоская задача.*

В основаниях сооружений различных технологических объектов часто возникают недопустимые деформации и дополнительные неравномерные осадки. Для решения проблемы инженерной защиты оснований опасных и аварийных объектов применяются различные новые технологические системы, например такие, как геоимплантатные конструкции.

Геоимплантатная конструкция представляет собой единый инженерный объект (геоимплантат и окружающую его геосреду), имеющий свое строго определенное функциональное назначение (слой усиления основания, дорожная одежда, укрепленная насыпь или склон, дренаж, трубопровод, система гашения колебаний, защитные ограждения и др.). Особенностью геоимплантатной конструкции является то, что она рассматривается как единый объект для инженерного расчета (общая расчетная схема, рассматривающая совместную работу конструкции и геосреды с единичными граничными условиями и системой нагрузок).

Для решения проблемы закрепления оснований фундаментов зданий и подобных технологических сооружений предлагается создавать под подошвой геоимплантатную конструкцию, состоящую из горизонтальных и параллельных друг другу геоимплантатов (армоэлементов) с зоной уплотнения вокруг них, которая возникает в процессе изготовления геоимплантатов [1]. Для того чтобы провести расчеты данных сооружений, необходимо построить расчетную схему геоимплантатной конструкции и описать общую модель геосреды основания.

В настоящее время для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) оснований фундаментов все чаще применяют, наряду с другими численными методами, метод конечных элементов (МКЭ). В нашем случае численное исследование НДС основания было проведено путем решения плоской задачи МКЭ для расчетной модели данной конструкции в упругопластической постановке с использованием методик расчета проф. А.Б. Фадеева [2].

Геоимплантатная конструкция представляет собой усиленный слой грунта в основании фундамента, состоящий из армоэлементов (собственно геоимплантат) и зоны уплотненного грунта вокруг них, которая возникает в процессе изготовления геоимплантатов (рис. 1).

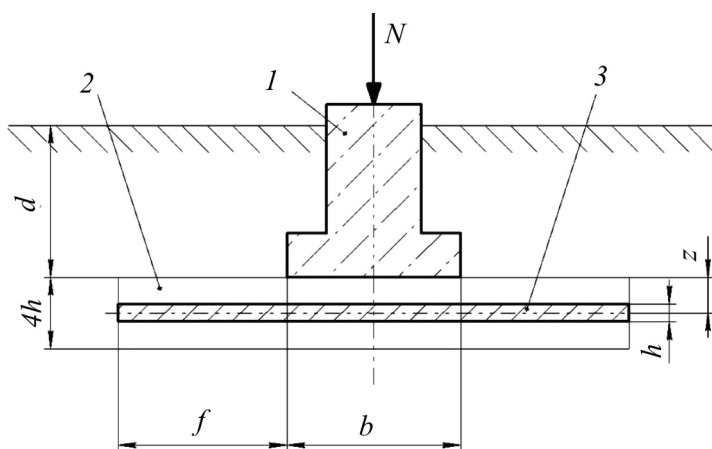


Рис. 1. Расчетная схема геоимплантатной конструкции:
 1 – ленточный фундамент; 2 – зона уплотнения;
 3 – геоимплантат (армоэлемент)

Моделью, описанной в программе численного решения, является деформационная идеальная упругопластическая модель среды. Решение в деформационной постановке обеспечивает единственность получаемых решений, соосность напряжений и деформаций.

Данная среда будет деформироваться упруго, вплоть до момента выхода в предельное состояние и не будет изменять сопротивление при дальнейшем деформировании.

Величина касательных напряжений ограничивается прочностными свойствами среды. Для описания предельной поверхности при неравномерном сжатии используется критерий Кулона. Он ставит величину предельного касательного напряжения τ на площадке в зависимость от нормального напряжения на этой площадке σ :

$$C + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi - \tau = 0, \quad (1)$$

или в главных напряжениях σ_1 и σ_3 :

$$\sigma_1 + \sigma_3 \cdot \operatorname{ctg}\psi - S = 0, \quad (2)$$

где C – сцепление; φ – угол внутреннего трения; $S = 2 \cdot C \cdot \operatorname{ctg}(45^\circ - \varphi / 2)$; $\operatorname{ctg}\psi = (1 + \sin\varphi) / (1 - \sin\varphi)$.

В пространстве главных напряжений предел текучести будет формировать некоторую поверхность, которую называют поверхностью текучести. Для рассматриваемой среды, в которой пластические деформации возникают только под действием касательных напряжений, поверхностью текучести будет поверхность, описываемая уравнением, подобным уравнению предельной поверхности.

Так как в нашей случае нагрузка на фундамент после создания усиленного слоя будет увеличиваться постепенно по мере строительства и ввода в эксплуатацию, то в процессе нагружения главные напряжения будут менять направление. Поэтому необходимо производить пошаговое нагружение и использовать модель, отвечающую принципам теории пластического течения.

При совпадении поверхности текучести и пластического потенциала вектор прироста деформаций $d\varepsilon^n$ оказывается нормальным к поверхности текучести. Так как поверхность текучести не параллельна гидростатической оси и расширяется (критерий Кулона), то ассоциированный закон течения прогнозирует возрастание объема. Несложно убедиться, что деформации вдоль действия напряжения σ_2 отсутствуют. Таким образом, применение критерия Кулона правомерно, так как он утверждает, что процесс деформирования определяется лишь соотношением σ_1 и σ_3 .

Рассмотрим, каким образом в программе достигается упругопластическое решение. Основная процедура МКЭ обеспечивает решение линейных задач НДС среды с линейно-упругой связью напряжений и деформаций. Получение различных нелинейных решений достигается многократным повторением линейных решений. Решение задачи распадается на два этапа. Первый – получение упругого (линейного) решения, второй – упругопластического (нелинейного).

Нагрузка прикладывается малыми ступенями в той последовательности, в какой происходит реальное нагружение в натуре. Напряжения и деформации в элементах, а также перемещения узлов от каждой ступени нагружения, накапливаются в специально отведенных

полях. Матрицы жесткости элементов и всей области формируются один раз и в процессе всего решения остаются постоянными.

Для каждой ступени нагружения, прикладываемой к области, первоначально решается система уравнений с вектором сил, составленным из нагрузок данной ступени нагружения. По найденным перемещениям узлов находят деформации и рассчитывают упругие напряжения:

$$\sigma_1 = E_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_3) / (1 - \nu_{\text{п}}^2), \quad (3)$$

$$\sigma_3 = E_{\text{п}} \cdot (\varepsilon_3 + \nu \cdot \varepsilon_1) / (1 - \nu_{\text{п}}^2),$$

где σ_1, σ_3 – главные нормальные напряжения; $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ – главные нормальные деформации; $E_{\text{п}} = E / (1 - \nu)^2$ – «плоский» аналог модуля Юнга E ; $\nu_{\text{п}} = \nu / (1 - \nu)$ – «плоский» аналог коэффициента Пуассона ν .

В области растяжения предельные напряжения будут ограничены прочностью на растяжение T :

$$\sigma_3 = T, \quad (4)$$

где $T = C / 5$ – в программе.

В области сжатия они будут ограничены критерием Кулона:

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \cdot \text{ctg}\psi. \quad (5)$$

Найденные упругие напряжения суммируются с ранее накопленными в данном элементе, вычисляются главные суммарные напряжения и сравниваются с границами текучести (рис. 2).

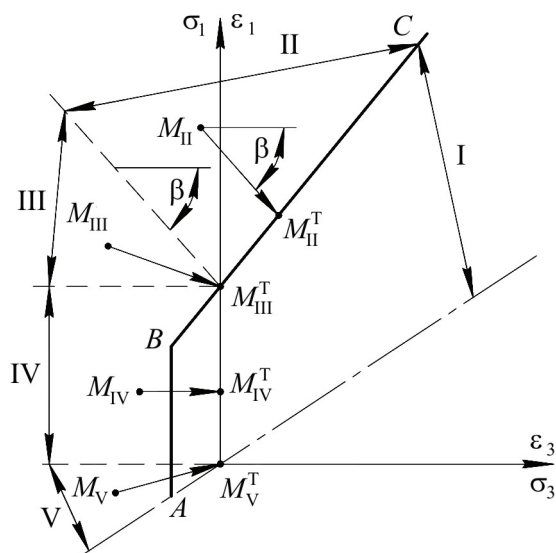


Рис. 2. Схема определения теоретических напряжений [2]

Если определяемая главными суммарными напряжениями σ_1^c и σ_3^c точка попадает в пределы области упругости I, то это значит, что элемент находится в упругом состоянии и корректировка напряжений не требуется. Если же точка оказалась вне контура текучести, то находятся точки теоретических напряжений в следующем порядке. Если точка суммарных напряжений M_{II} попадает в область II (основную зону пластичности), то теоретическая точка M_{II}^T лежит на пересечении границы текучести с прямой $M_{II} M_{II}^T$. Угол β наклона прямой $M_{II} M_{II}^T$ определяется законом течения и задан. При ассоциированном законе $\beta = \psi$.

При известных координатах точки M_{II} (σ_1^c, σ_3^c) уравнение прямой $M_{II} M_{II}^T$ имеет вид

$$(\sigma_1 - \sigma_1^c) = -\operatorname{tg}\beta (\sigma_3 - \sigma_3^c). \quad (6)$$

Уравнение предельной линии BC известно (5). Совместное решение уравнений (5) и (6) относительно σ_1 и σ_3 дает координаты точки M_{II}^T (теоретические напряжения):

$$\sigma_3^T = (\sigma_3^c - S + \operatorname{tg}\beta \cdot \sigma_3^c) / (\operatorname{tg}\beta + \operatorname{ctg}\psi), \quad (7)$$

$$\sigma_1^T = S + \sigma_3^T \cdot \operatorname{ctg}\psi.$$

Если точка суммарных напряжений попадает в зону III (точка M_{III} на рис. 3), то теоретические напряжения таковы: $\sigma_1^T = S, \sigma_3^T = 0$. Элемент будет разорван в направлении действия напряжения σ_3 , а напряжение σ_1 снизится до уровня сопротивляемости среды одноосному сжатию. Для области IV, в которой напряжения не превосходят сопротивляемости среды одноосному сжатию, $\sigma_1^T = \sigma_1^c, \sigma_3^T = 0$. Наконец, для области V, в которой элемент будет разорван по всем направлениям, $\sigma_1^T = \sigma_3^T = 0$. Напомним, так как среда является идеально-пластической, то параметры границы текучести S, φ и T остаются постоянными.

Затем реализуется шагово-итерационный процесс с постоянной МЖС. Решение для очередного n -го шага нагрузки достигается по методу начальных напряжений (модифицированный метод Ньютона – Рафсона). К началу шага известны суммарные напряжения в элементах от $(n - 1)$ предыдущих ступеней $\{\sigma\}_{n-1}$. К области прикладывается вектор сил (и заданных перемещений) очередной ступени нагрузки и в итерационном режиме повторяются упругие решения.

Общий алгоритм получения упругопластического решения с пошаговым нагружением состоит в следующем:

1. Ввод информации.
2. Засылка нулей в поле хранения накапливаемых напряжений $\{\sigma\}$ в элементах суммарных перемещений узлов $\{\delta^c\}_c$.
3. Формирование МЖС и ее обращение.
4. Для каждой ступени нагружения выполняются операторы 5–24.
5. Засылка в вектор $\{F^c\}$ сил от очередной ступени нагружения.
6. Засылка нулей в поле хранения начальных напряжений $\{\sigma\}_n$.
7. Вычисление неизвестных перемещений в векторе $\{\delta^c\}$ по текущему значению вектора $\{F^c\}$ путем решения системы уравнений.
8. Для каждого из элементов выполняются операторы 9–21.
9. По найденным перемещениям вычисляются деформации, далее по формулам закона Гука – упругие приращения напряжений $\{\Delta\sigma\}_y$.
10. Вычисляются фактические приращения напряжений путем вычитания ранее накопленных начальных из упругих:

$$\{\Delta\sigma\}_f = \{\Delta\sigma\}_y - \{\Delta\sigma\}_n.$$

11. Вычисляются суммарные напряжения путем суммирования фактических приращений и ранее накопленных напряжений:

$$\{\sigma_c\} = \{\sigma\} + \{\Delta\sigma\}_f.$$

12. Вычисляются главные суммарные напряжения:

$$\{\sigma\}_{ct} = \{\sigma_1^c \ \sigma_3^c \ \alpha\}^T.$$

13. По заданным законам упрочнения (разупрочнения) и пластического течения вычисляются текущие параметры границы текучести и поверхности пластического потенциала (C , φ , T , β).

14. В соответствии с ранее изложенной процедурой вычисляются главные теоретические напряжения: $\{\sigma\}_{tt} = \{\sigma_1^t \ \sigma_3^t\}^T$.

15. Вычисляются осевые теоретические напряжения $\{\sigma\}^T$ по формулам:

$$\sigma_x^t = \sigma_1^t \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \sin^2 \alpha;$$

$$\sigma_y^t = \sigma_1^t \cdot \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha;$$

$$\tau_{xy} = 0,5 (\sigma_1^t - \sigma_3) \cdot \sin 2\alpha.$$

Использование в формулах угла α обеспечивает соосность приращений главных пластических деформаций с главными напряжениями, что соответствует положениям теории пластического течения.

16. Вычисляются приращения начальных напряжений:

$$\{\Delta\sigma\}_n = K(\{\sigma\}_c - \{\Delta\sigma\}_T),$$

где K – коэффициент ускорения итераций, $K = 1,5$.

17. Накопление начальных напряжений:

$$\{\sigma\}_n = \{\sigma\}_{n-1} + \{\Delta\sigma\}_n.$$

18. Вычисление начальных узловых сил в узлах элемента по формуле:

$$\{F\}_n = [B]^T \cdot \{\Delta\sigma\}_n.$$

19. Добавление начальных узловых сил к вектору сил:

$$\{F^c\} = [\{F^c\} + \{F\}_n].$$

20. Проверка достигнутой точности решения в элементе. Если хоть один компонент напряжений $\{\Delta\sigma\}_n$ превосходит заданную допустимую величину, то вводится признак необходимости продолжения итерации.

21. Конец цикла по элементам.

22. Если признак необходимости продолжения итерации введен, то вновь выполняются операторы, начиная с 7.

23. Добавление напряжений $\{\Delta\sigma\}_\phi$ и узловых перемещений $\{\delta^c\}$ к накапливаемым:

$$\{\sigma^c\} = \{\sigma\} + \{\Delta\sigma\}_\phi,$$

$$\{\delta^c\} = \{\delta\}_c + \{\delta^c\}.$$

24. Конец цикла по ступеням нагружения.

25. Печать выводимой информации.

26. Конец.

Если нагрузку прикладывать сразу полностью (в одну ступень), то получаемые по этой процедуре решения оказываются тождественны (в пределах заданной точности) с решениями по деформационным моделям.

Список литературы

1. Янковский Л.В. Разработка метода закрепления оснований ленточных фундаментов при реконструкции: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1991. – 178 с.

2. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

Получено 18.03.2011