Инженерный вестник Дона, №2 (2018)
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4901

Моделирование работы оползневых склонов при динамическом воздействии

Л.Н. Панасюк, В.С. Тюрина, Ю.Ш. Чубка, А.У-Б. Пошев

Академия строительства и архитектуры Донского государственного технического университета, Ростов-на-Дону

Аннотация: В данной статье рассматривается механико-математическая модель деформирования и развития зон пластических деформаций в оползневых склонах при статическом и динамическом воздействии с учетом физической и геометрической нелинейности.
Ключевые слова: оползневой склон, зона пластической деформации, динамическое воздействие, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, девиатор напряжений, тензор напряжений, деформируемость грунтовой среды.

Одной из основных проблем современной строительной механики является разработка уточненных методов расчета искусственных сооружений на деформируемых основаниях [1-4]. Если для зданий и сооружений, находящихся или проектируемых на площадках со сравнительно «спокойным» рельефом зачастую используют упрощенные параметрические модели деформируемого основания, то для объектов, возводимых на площадках со сложным рельефом (особенно вблизи склонов) такие модели могут дать не только количественно, но и качественно неверные результаты. В свою очередь, использование уточненных механико-математических моделей позволит не только получить более достоверные результаты работы системы «сооружение – фундамент – деформируемое основание», но и корректно решить вопросы усиления основания. Проблема является достаточно актуальной, т.к. усиление основания в сложных геологических условиях может приводить к достаточно высоким затратам. Например, при строительстве на структурно-неустойчивых грунтах, стоимость работ нулевого цикла составляет 25-30% от общей сметной стоимости строительства.

Принципиальным в развитии расчетных схем стал учет нелинейных (геометрической, физической и конструктивной) свойств грунтов при различных динамических воздействиях [1,3]. Физическая нелинейность при описании математических моделей поведения грунтовой среды учитывается нелинейной зависимостью σ~ε. Геометрическая нелинейность обуславливается нелинейной зависимостью между перемещениями и деформациями, особенно проявляющейся при динамических воздействиях. Конструктивная нелинейность обусловлена тем, что в процессе деформирования грунтового основания происходит разрушение старых и возникновение новых структурных связей.

В данной статье рассматривается механико-математическая модель деформирования и развития зон пластических деформаций в оползневых склонах при статическом и динамическом воздействии с учетом физической и геометрической нелинейности.

При решении задачи о распределении остаточных деформаций по глубине грунтового основания Л.Р.Ставницером показано [5], что характер диаграммы σ~ ε при динамических воздействиях является слишком сложным для того, чтобы было целесообразно аппроксимировать ее непрерывной кривой. Кроме того, свойства грунтов менее стабильны и однородны, чем для большинства искусственных сред, и поэтому нет необходимости точного подборе кривой, так как естественный разброс результатов может быть весьма значительным. В этих условиях представляется оправданным аппроксимировать зависимость моделью Прандтля с линейным упрочнением.

Использование компьютерного моделирования позволило выработать технологию исследования сложных проблем, основанную на построении и анализе с помощью ЭВМ математических моделей поведения грунтов при различных статических и динамических воздействиях, а также дало возможность построить новые математические модели грунта на основе численного моделирования. Основное требование, предъявляемое к численным методам, является обеспечение заданной точности вычислений и устойчивости самого вычислительного процесса.

Известно, что процесс деформирования грунтов обуславливается воздействием всех трех инвариантов тензора напряжений. Поскольку грунт является дисперсной средой, интерес представляет собой изучение взаимного влияния первого и второго инвариантов тензора напряжений на развитие объемных деформаций. Экспериментальные исследования многих авторов (А.И.Боткина, Б.Н.Барщевского, Г.М.Ломизе, С.С.Вялова, Е.В.Виноградова, В.А.Иоселевича, Ю.К.Зарецкого, А.С. Строганованого), показали, что и формоизменение и объемные деформации грунтов зависят одновременно от величины всестороннего обжатия и девиатора напряжений. В [6] отмечается, что на основании анализа результатов экспериментов и их сопоставления в единообразной инвариантной форме сформулированы следующие общепринятые в нелинейной механике грунтов представления о деформируемости грунтовой среды при ее нагружении:

1. В грунтах деформация формы зависит не только от девиатора, но и от гидростатической части тензора напряжений.

2. Объемная деформация зависит не только от шарового тензора напряжений, но и от девиатора напряжений.

3. При простом нагружении грунтов с достаточно высокой точностью соблюдается подобие и соосность тензоров напряжений и деформаций. В литературных источниках исторически принято взаимное влияние первого и второго инвариантов тензора напряжений на развитие объемной деформации называть дилатансией.

Итерационный процесс Ньютона решения физически и геометрически нелинейной задачи (1) деформирования грунтового массива позволяет получить основные соотношения для формирования «секущей» и «касательной» матриц жесткости при использовании метода конечных элементов.

$$\mathrm{A}^T\sigma+\rho=0 \quad , \tag{1}$$

где $\sigma=D_0^n Au$ на $(n+1)$ приближении дает:

$$\mathrm{A}^T\left(\sigma^n+J^n\Delta\varepsilon\right)+\rho=0 \tag{2}$$

$$\sigma^n=D_0{}^n\mathrm{A}u^n \tag{3}$$

J -матрица Якоби, элементы которой вычисляются при

$$J=\begin{bmatrix}\frac{\partial\sigma_x}{\partial\varepsilon_x}L & M & \frac{\partial\sigma_x}{\partial\gamma_{yz}}\\ \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial\varepsilon_x}L & & \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial\gamma_{yz}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial^2U}{\partial\varepsilon_x{}^2}L & M & \frac{\partial^2U}{\partial\varepsilon_x\partial\gamma_{yz}}\\ \frac{\partial^2U}{\partial\gamma_{yz}\partial\varepsilon_x}L & & \frac{\partial^2U}{\partial\gamma_{yz}{}^2}\end{bmatrix}=H_1 \tag{4}$$

Подставив (2-4) в (1), с учетом геометрических зависимостей, получаем матричное уравнение (5).

$$\mathrm{A}^T\mathrm{H}_1\mathrm{A}\Delta u=-\rho-\mathrm{A}^T D_0{}^n\mathrm{A}u^n,\in V \tag{5}$$

Уравнение (5) можно рассматривать как уравнение Эйлера для квадратичной аппроксимации (6) функционала Лагранжа в окрестности, достигнутого на итерации n, уровня напряженно-деформированного состояния.

$$\pi_1\approx\Pi_1=\int\limits_{(v)}\left[u\left(\varepsilon^n\right)+u'\left(\varepsilon^n\right)\Delta\varepsilon+\frac{1}{2}\Delta\varepsilon^T\mathrm{H}_1{}^n\Delta\varepsilon\right]dv-\int\limits_{(v)}u^T\rho dv-\int\limits_{(S_1)}u^T g_s dS \tag{6}$$

При использовании теории пластического течения с упрочнением используются гипотезы, что среда изотропна, пластически сжимаема, приращение деформаций складываются из приращений упругой и пластических составляющих (7):

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{\ e} + d\varepsilon_{ij}^{\ P} \tag{7}$$

После ряда преобразований пластические деформации записываются как (8):

$$d\varepsilon_{ij}^{\ P} = \left(\frac{1}{3}\delta_{ij}\alpha_1 + \frac{3}{2}\cdot\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\alpha_2'\right)d\sigma_0 + \left(\frac{1}{3}\delta_{ij}\alpha_2'' + \frac{3}{2}\cdot\frac{S_{ij}}{\sigma_i}\alpha_3\right)d\sigma_i \tag{8}$$

где $\alpha_1 = \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial\sigma_0}$, $\alpha_2' = \dfrac{\partial\varphi_2}{\partial\sigma_0}$, $\alpha_2'' = \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial\sigma_i}$, $\alpha_3 = \dfrac{\partial\varphi_2}{\partial\sigma_i}$

или $d\varepsilon_{ij}^{P} = \dfrac{\partial\phi_1}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_0 + \dfrac{\partial\phi_2}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_i = (d\varepsilon_{ij}^{P})_0 + (d\varepsilon_{ij}^{P})_i$

Функции ϕ_1 и ϕ_2 являются пластическими потенциалами. Для появления пластических деформаций необходимо выполнение условий (9):

$$d\sigma_{ij}\frac{\partial\phi_1}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_0 > 0;\ d\sigma_{ij}\frac{\partial\phi_2}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_i > 0; \tag{9}$$

При численной реализации определяющие уравнения записывают [7,8] так:

$$\sigma = \sigma^n + \widetilde{H}_1^{\ n}\Delta\varepsilon \tag{10}$$

В (10):

$$\widetilde{H}_1 = D_0 + (K_k - K_0)D_1 - \frac{2}{9\varepsilon_i}\left(\delta_{km}\beta_2' e_{ij} - \delta_{ij}e_{km}\beta_2''\right) + \frac{4}{3\varepsilon_i^{\ 2}}(G_k - G_0)D_3,$$

$$\Delta\sigma^T = \{d\sigma_{11}\ldots d\tau_{23}\}$$

$$\Delta\varepsilon^T = \{d\varepsilon_{11}\ldots d\gamma_{23}\}$$

$D_0 =$

$K_0+\frac{1}{3}G_0$	$K_0-\frac{2}{3}G_0$	$K_0-\frac{2}{3}G_0$	0	0	0
	$K_0+\frac{4}{3}G_0$	$K_0-\frac{2}{3}G_0$	0	0	0
		$K_0+\frac{4}{3}G_0$	0	0	0
			G_0	0	0
				G_0	0
СИММЕТРИЧНО					G_0

$D_1 =$

1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

$D_3 =$

e_{11}^{2}	$e_{11}e_{22}$	$e_{11}e_{33}$	$e_{11}e_{12}$	$e_{11}e_{13}$	$e_{11}e_{23}$
	e_{22}^{2}	$e_{22}e_{33}$	$e_{22}e_{12}$	$e_{22}e_{13}$	$e_{22}e_{23}$
		e_{33}^{2}	$e_{33}e_{12}$	$e_{33}e_{13}$	$e_{33}e_{23}$
			e_{12}^{2}	$e_{12}e_{13}$	$e_{12}e_{23}$
				e_{13}^{2}	$e_{13}e_{23}$
СИММЕТРИЧНО					e_{23}^{2}

$D''_2 =$

0	$e_{11} - e_{22}$	$e_{11} - e_{33}$	$-e_{12}$	$-e_{13}$	$-e_{23}$
$e_{22} - e_{11}$	0	$e_{22} - e_{33}$	$-e_{12}$	$-e_{13}$	$-e_{23}$
$e_{33} - e_{11}$	$e_{33} - e_{22}$	0	$-e_{12}$	$-e_{13}$	$-e_{23}$
e_{12}	e_{12}	e_{12}	0	0	0
e_{13}	e_{13}	e_{13}	0	0	0
e_{23}	e_{23}	e_{23}	0	0	0

Нелинейные уравнения движения по методу конечных элементов имеют вид [9-11]:

$$\begin{cases} (2M + \Delta t\beta C + 0{,}5\Delta t^2\beta^2 K_{/K,n})q_{n+1} = (2M + \Delta t\beta C + 0{,}5\Delta t^2\beta^2 K_{K,n})q_n + \\ (2M + \Delta t(\beta - 1)C + 0{,}5\Delta t^2\beta^2 K_{K,n} - 0{,}5\Delta t^2\beta K_{K,n})S_n + \\ \Delta t^2(1 - 0{,}5\beta)P_n + 0{,}5\Delta t^2\beta P_{n+1}, \\ S_{n+1} = -S_n + 2(q_{n+1} - q_n), S = \Delta t q \end{cases} \tag{11}$$

Для численного решения (11) построена абсолютно устойчивая схема (12) прямого интегрирования уравнения движения.

$$\begin{cases} R\,q_{n+1} = \left(R - \dfrac{1}{\beta}K_{C,n}\right)q_n + \left(R - 0.5K_{C,n}\right)s_n, \\ R = \dfrac{2}{\beta\,\Delta t^2}M + 0.5\beta\,K_{K,n} \\ s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n),\ s = \Delta t\,q \end{cases} \tag{12}$$

Литература

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 650 с.

2. Lee W. Abramson, Thomas S. Lee Sunil Sharma, Glenn M. Boyce Slope stability and stabilization methods. Second Edition. New York: Wiley Pages, 2002. 736 p.

3. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала. М.: Госстройиздат. 1954. 129 с

4. Batht K.-J. Finite Element Procedures. K.-J. Batht .New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10-12.

5. Ставницер Л.Р. Деформации оснований сооружений от ударных нагрузок. М.: Стройиздат, 1969. 350 с.

6. Бугров А.К., Нарбут Р.М., Сипидин В.П Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. М.: Стройиздат, 1987. 185 с.

7. Ананьев И.В. Некоторые методы решения динамических задач строительной механики: дис. ... д-р. техн наук: 05.23.17. Ростов-на-Дону, 1993. 356 с.

8. Ананьев И.В., Васильков Г.В., Хадисов М.К. Экспериментальное исследование ударного уплотнения лессовых грунтов ненарушенной структуры // Изв.Вузов.Строительство. 1992. С. 115-117.

9. Чубка Ю.Ш., Тюрина В.С., Панасюк Л.Н. Решение задач в постановке нелинейной наследственности// Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n3y2016/3742

10. Тюрина В.С., Чубка Ю.Ш., Панасюк Л.Н. Моделирование работы подкрепленных оползневых склонов методом конечных элементов// Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3733

11. Панасюк Л.Н Прямые методы решения нестационарных задач теории сооружений: дис. … д-р. техн. наук: 05.23.17. Ростов-на-Дону, 1996. 389 с.

References

1. Rabotnov Ju.N. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. [Mechanics of deformable solid]. M.: Nauka, 1979. 650 p.

2. Lee W. Abramson, Thomas S. Lee Sunil Sharma, Glenn M. Boyce Slope stability and stabilization methods. Second Edition. New York: Wiley Pages, 2002. 736 p.

3. Rzhanicyn A.R. Raschet sooruzhenij s uchetom plasticheskih svojstv materiala. M.: Gosstrojizdat. 1954, 129 p. [Calculation of structures with consideration of plastic properties of the material].

4. Batht K.-J. Finite Element Procedures. K.-J. Batht .New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10-12.

5. Stavnicer L.R. Deformacii osnovanij sooruzhenij ot udarnyh nagruzok. M.: Strojizdat, 1969. 350 p. [Deformation of the bases of structures from shock loads].

6. Bugrov A.K., Narbut R.M., Sipidin V.P Issledovanie gruntov v usloviyah trekhosnogo szhatiya. M.: Strojizdat, 1987. 185 p. [The investigation of soils under conditions of triaxial compression].

7. Anan'ev I.V. Nekotorye metody reshenija dinamicheskih zadach stroitel'noj mehaniki: dis. ... d-r. tehn nauk: 05.23.17. Rostov-na-Donu, 1993. 356 s. [Some methods of solving dynamic problems of building mechanics].

8. Anan'ev I.V., Vasil'kov G.V., Hadisov M.K. Eksperimental'noe issledovanie udarnogo uplotneniya lessovyh gruntov nenarushennoj struktury. Izv.Vuzov.Stroitel'stvo. 1992. pp. 115-117. [Experimental investigation of impact compaction of loess soils of undisturbed structure].

9. Chubka Ju.Sh., Tyurina V.S., Panasjuk L.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3742

10. Chubka Ju.Sh., Tyurina V.S., Panasjuk L.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3733

11. Panasjuk L.N Prjamye metody reshenija nestacionarnyh zadach teorii sooruzhenij: dis. d-r. tehn. nauk: 05.23.17. Rostov-na-Donu, 1996. 389 p. [Direct methods for solving nonstationary problems of the theory of structures].