

УДК 624.154

Буслов А.С. – доктор технических наук, профессор

E-mail: a.buslov@yandex.ru

Московский государственный машиностроительный университет

Адрес организации: 107996, Россия, г. Москва, ул. П. Корчагина, д. 22

Бакулина А.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: alexandrabakulina@yandex.ru

Рязанский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета

Адрес организации: 390000, Россия, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53

**Применение уравнений механики разрушения
для модели нелинейного повреждаемо-упрочняющегося основания**

Аннотация

В работе на основе полученных по результатам испытаний горизонтально нагруженных свай нелинейных графиков «нагрузка-перемещения» сформулирована модель нелинейного повреждаемо-упрочняющегося основания. В соответствии с ней при увеличении уровня нагрузки $m=P_r/P_{kp}$ (повреждающего фактора) увеличивается нарушение сплошности – «отпорности» основания. При этом поврежденность m в предлагаемой зависимости является в отличие от известной модели Л.М. Качанова фактором, влияющим как на расслабление, так и упрочнение грунта. Таким образом, в предлагаемой математической модели объединяются модели разрушения Ю.Н. Работникова, Л.М. Качанова, модель упругопластических деформаций С.С. Вялова и модель Баха нелинейного деформирования с упрочнением.

Ключевые слова: нелинейная деформируемость; поврежденность; сплошность; «отпорность» основания.

Изменения со временем механических свойств материалов под нагрузкой имеют различную природу. Накапливающиеся повреждения в большей или меньшей степени связаны с напряженно-деформированным состоянием материала. Так, накопление повреждений в условиях пластичности и ползучести, что характерно для грунтовых оснований, прежде всего, зависит от уровня напряжений [1].

Необходимо отметить, что накопление повреждений является случайным процессом. В принципе можно было бы вычислить уровень поврежденности, зная условия возникновения и развития микродефектов и применяя статистические методы. Но элементарные механизмы возникновения дефектов и условия их развития известны лишь в самых грубых чертах. О формулировках количественных характеристик, функций распределения, зависимостей между случайными дефектами говорить трудно. Поэтому трудно провести и обоснованный статистический анализ, не говоря уже о том, что такой анализ связан с введением многих неизвестных параметров и функций.

Подобное положение побуждало, естественно, к поискам других путей, не столь «физических», но допускающих простое сопоставление с опытными данными и рассмотрение различных прикладных задач. Этого было достигнуто путем введения некоторой априорной характеристики поврежденности, которая устанавливается сравнением следствий теории с экспериментальными данными.

В механике твердого деформируемого тела под разрушением понимается исчерпание несущей способности тела, произшедшее или вследствие беспрепятственного пластического течения (неограниченного изменения формы) или вследствие накопления повреждений и развития трещин; возможны и смешанные картины разрушения. Вполне понятно, что изменение под нагрузкой и во времени механических свойств материалов имеет различную природу. Однако феноменологически, эти процессы нередко можно интерпретировать в том или ином смысле как некоторые процессы накопления повреждений, различных дефектов, микропор, трещин.

Ю.Н. Работнов ввел функцию $m \geq 0$, равную нулю в начальном состоянии и единице в момент разрушения, которую называют поврежденностью (в отличие от сплошности Ψ).

В простейшем варианте функцию нарушения сплошности от поврежденности можно описать некоторым скаляром $1 \geq \psi \geq 0$ (Л.М. Качанов) [2]. В начальном состоянии, при отсутствии поврежденности, $\psi = 1$; с увеличением m функция ψ убывает. Функция ψ , по сути дела, интерпретируется как «сплошность».

Соответственно можно считать, что:

$$\psi = 1 - m. \quad (1)$$

Многочисленные исследования штампов и свай под действием вертикальных и горизонтальных нагрузок показывают, что зависимость между нагрузкой и деформациями фундаментов носит выраженный нелинейный характер. В свою очередь, это свидетельствует о том, что с увеличением нагрузки на фундамент нелинейно изменяется «отпорность» основания [3]. На основании результатов исследований, проведенных с моделями горизонтально нагруженных свай, был проведен анализ характера нелинейной зависимости «отпорность основания – нагрузка» [4].

Из рис. 1 видно, что опытный график зависимости «отпорность основания – нагрузка» $C_p = f(P_g)$, характерный для полученных нами опытных данных, разделяет графическое пространство на две области: область поврежденности, увеличивающейся по мере увеличения нагрузки, и область сплошности, уменьшающейся по мере увеличения поврежденности.

Таким образом, изменение деформационного параметра C_p системы «свая – грунт» в сторону его уменьшения под действием увеличивающейся горизонтальной нагрузки можно рассматривать как результат накопления повреждений основания (в рассматриваемой задаче перемещений горизонтально нагруженной сваи – пластические деформации нелинейно деформируемой среды).

На рис. 2 график зависимости «отпорность основания – нагрузка» (рис. 1) представлен в безразмерных величинах $m = P_g / P_{kp}$ и $\psi = C_p^{\text{перем}} / C_p^{\text{нач}}$. Кривая 1 построена по данным опытных испытаний модельной сваи диаметром $d = 4$ см; глубиной $L = 20$ см при изменении высоты приложения горизонтальной нагрузки от $H = 0$ до $H = 1,5L$. Кривая 2 построена на основании зависимости (1) Л.М. Качанова. Подобная картина характерна для всех проведенных испытаний моделей горизонтально нагруженных свай, в том числе с кольцевыми уширениями.

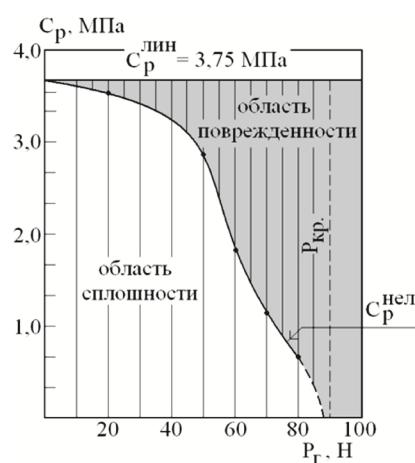


Рис. 1. График зависимости «отпорность основания – нагрузка»
по данным испытания модельной сваи [3]

Из приведенных данных следует, что **поврежденность** m представляет собой безразмерную силовую характеристику степени приближения повреждающей нагрузки P_g к пределу сопротивления P_{kp} (повреждаемости) материала. По аналогии с уровнем напряжений по С.С. Вялову [5], равному отношению σ / σ_{kp} , параметр $m = P_g / P_{kp}$ можно назвать уровнем нагружения свайной опоры.

Сплошность ψ имеет смысл безразмерной физической характеристики степени снижения «отпорности» C_p по мере поврежденности материала основания.

Таким образом, введением в упругое (линейное) решение деформаций линейно деформируемой среды функции сплошности Ψ , зависящей от уровня напряжений (поврежденности), можно отразить нелинейный процесс деформирования как развитие пластических деформаций вплоть до ее разрушения [6].

Из рис. 2 видно, что опытная кривая зависимости $\psi=f(m)$ значительно отличается от зависимости (1) Л.М. Качанова. Это объясняется тем, что в зависимости (1) не учитывается уплотнения среды в процессе увеличения нагрузки и соответствующего изменения деформационных характеристик [7, 8].

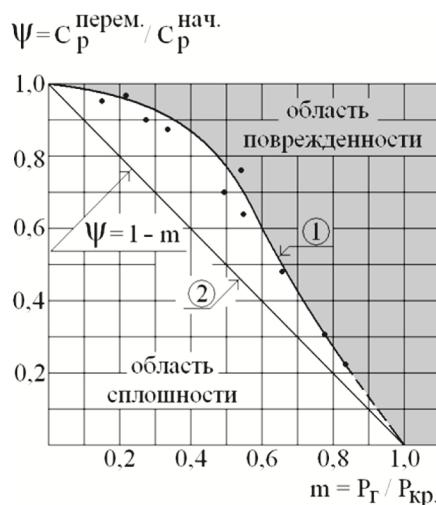


Рис. 2. Зависимость «отпорность – нагрузка» в безразмерных величинах $\psi=C_p^{\text{перем.}}/C_p^{\text{нач.}}$ и $m=P_g/P_{\text{кр.}}$:
1 – по данным опытных испытаний; 2 – в соответствии с зависимостью Л.М. Качанова [1]

С.С. Вяловым [4] было показано, что в основе деформирования грунтов лежат два взаимопротивоположных явления – упрочнение (за счет уплотнения) и расслабление (как повреждаемость) грунта. При этом если превалирует первое из этих явлений, то деформации затухают и разрушение не происходит, если же превалирует расслабление, то в грунте развивается незатухающая ползучесть, приводящая к его разрушению.

Для того чтобы сблизить теоретическую и опытную кривые (рис. 2), необходимо в зависимость (1) Л.М. Качанова для ψ ввести степенной параметр, замедляющий развитие нарушения сплошности при увеличении уровня нагружения свайной опоры.

Из рис. 2 следует, что теоретическая (по Л.М. Качанову) и опытная (наши исследования) кривые сходятся в точках при $m=0$ и $m=1$. Это условие соблюдается, если правую часть уравнения (1) возвести в степень m :

$$\psi=(1-m)^m. \quad (2)$$

При $m=0 \psi=1$; при $m=1 \psi=0$, то есть опытная и теоретические кривые в этих точках совпадают.

Для иных уровней нагрузки в пределах $0 < m < 1$ показатель сплошности $0 < \psi < 1$. Возведение функции ψ в степень $m < 1$ в соответствии с формулой (2) приводит к увеличению значений ψ по сравнению с формулой Л.М. Качанова (1). Таким образом, введение в формулу повреждаемости степени $m=P_g/P_{\text{кр.}}$ позволяет сблизить теоретическую зависимость с опытной кривой. По аналогии с формулой Баха [4] параметр m , используемый в предлагаемой нами формуле (2) в качестве степени функции $\psi=f(m)^m$ играет роль коэффициента упрочнения.

Однако, в отличие от формулы Баха, где параметр m является эмпирическим, в предлагаемой зависимости он имеет определенный физический смысл. Этот параметр отражает тот факт, что с увеличением уровня нагрузки на грунтовое основание, наряду с его ослаблением и увеличением повреждаемости, происходит и консолидация, т.е. уплотнение грунта, завершающееся при приближении нагрузки к критическому значению.

В соответствии с зависимостью (2) для переменной отпорности основания $C_p^{\text{перем}}$ имеем:

$$C_p^{\text{перем}} = C_p^{\text{наг}}(1-m)^m, \quad (3)$$

где $m = P_r/P_{\text{кр}}$.

Зависимость (3) фактически является уравнением нелинейной повреждаемости основания. В соответствии с ней при увеличении уровня нагрузки $m = P_r/P_{\text{кр}}$ (повреждающего фактора) увеличивается нарушение сплошности – «отпорности» основания. При этом поврежденность m в предлагаемой зависимости является в отличие от модели Л.М. Качанова фактором, влияющим как на расслабление, так и упрочнение грунта. Таким образом, в зависимости (3) объединяются модели разрушения Ю.Н. Работнова, Л.М. Качанова, модель упругопластических деформаций С.С. Вялова и модель нелинейного деформирования с упрочнением Баха.

Список библиографических ссылок

- Бакулина А.А., Буслов А.С. Исследование МКЭ напряженно-деформированного и силового взаимодействия фундаментов одностоечных горизонтально нагруженных опор с упругим полупространством // Промышленное и гражданское строительство в современных условиях: сб. науч. Тр. Института стр-ва и архит-ры.: материалы Междунар. Науч.-техн. конф. – М.: МГСУ, 2011. – 257 с.
- Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – 311 с.
- Буслов А.С. Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах. – Ташкент: Фан, 1979. – 106 с.
- Буслов А.С., Бакулина А.А. Уравнения нелинейной повреждаемости основания по данным испытаний моделей горизонтально нагруженных свай // Вестник МГСУ. Научно-технический журнал, 2012, № 12. – М.: МГСУ, 2012. – 302 с.
- Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
- Буслов А.С., Бакулина А.А. Влияние кольцевого уширения на несущую способность горизонтально нагруженной моносвайной опоры // Вестник МГСУ. Научно-технический журнал, 2012, № 4. – М.: МГСУ, 2012. – 256 с.
- Rashed A., Bolouri Bazaz J., Hossein Alavi A. Nonlinear modeling of soil deformation modulus through LGP-based interpretation of pressuremeter test results. J.Engineering Applications of Artificial Intelligence, V. 25, Issue 7, October, 2012. – 1760 p.
- Bakulina A.A., Buslov A.S. FEM Analysis of the laterally loaded Pile with rigid plate. Collection of works «14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering». – М.: MGSU, 2012. – 566 p.

Buslov A.S. – doctor of technical science, professor

E-mail: a.buslov@yandex.ru

Moscow State University of Mechanical Engineering

The organization address: 107996, Russia, Moscow, P. Korchagina st., 22

Bakulina A.A. – candidate of technical science, associate professor

E-mail: alexandrabakulina@yandex.ru

Ryazan Institute (Branch) of the Moscow Mashinbildung State University of Mechanical Engineering

The organization address: 390000, Russia, Ryazan, Pravo-Lybedskaia st., 26/53

Fracture mechanics application to nonlinear damage-hardening model of soil base

Resume

For the most part, resistance and displacements of the laterally loaded pile depend on the frontal soil resistance. For increasing pile resistance, the horizontal lying beams (sole), ground cap or rigid plate can be used. For this purpose, a rigid plate has been used for increased pile resistance under the changeable direction of the horizontal load and moment action.

In this article on the basis of the test results of the horizontally loaded piles by nonlinear «load-displacement» curves the model of nonlinear damage-hardening soil base is proposed. In accordance with it when the load level $m=P_r/P_{kp}$ (damage factor) is increasing the violation of the soil continuity is increasing in the same way. Damage factor m in the proposed subject is unlike the known model L.M. Kachanov factor affecting both damaging and hardening of soil. Thus, the proposed mathematical model of combined model of G. Rabotnov, L.M. Kachanov, the model of elastoplastic deformation of S.S. Vyalov and Bach's model with nonlinear deformation hardening.

Keywords: nonlinear deformation, damage, soil continuity, response ability factor of soil.

References list

1. Bakulina A.A., Buslov A.S. Research of the stress-strain study and force interaction of foundations of single-column laterally loaded supports with an elastic half-space using FEM. Collection works of the Institute of Construction and Architecture. – M., MGSU Publ., 2011. – 257 p.
2. Kachanov L.M. Fundamentals of aracture mechanics. – M.: Publishers Nauka, 1974. – 311 p.
3. Buslov A.S. Behaviour of piles exposed to lateral load beyond the limits of elasticity in cohesive soils. – Tashkent: Fan, 1979. – 106 p.
4. Buslov A.S., Bakulina A.A. Equations of nonlinear soil damage based on results of testing of laterally loaded pile models // Vestnik MGSU. Nauchno-tehnicheski zgurnal. 2012, № 12 – M.: FGBOU VPO MGSU, 2012. – 302 p.
5. Vyalov S.S. Rheological fundamentals of soil mechanics. – M.: Vis.shk., 1978. – 447 p.
6. Buslov A.S., Bakulina A.A. Effect of a round cap on the bearing capacity of a laterally loaded pile // Vestnik MGSU. Nauchno-tehnicheski zgurnal, 2012, № 4. – M.: MGSU, 2012. – 256 p.
7. Rashed A., Bolouri Bazaz J., Hossein Alavi A. Nonlinear modeling of soil deformation modulus through LGP-based interpretation of pressuremeter test results. J. Engineering Applications of Artificial Intelligence, V. 25, Issue 7, October, 2012. – 1760 p.
8. Bakulina A.A., Buslov A.S. FEM Analysis of the laterally loaded Pile with rigid plate. Collection of works «14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering». – M.: MGSU, 2012. – 566 p.