УДК 622.02:
624.1

И.И. Шорников

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРОДАВЛИВАНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ: ОЦЕНКА ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Приведен метод оценивания значений нажимных усилий, действующих от силовой установки, при продавливании тоннельных обделок в технологии микротоннелирования. оцениваются граничные их значения: максимальные и минимальные. Оценивание проведено для фрикционной составляющей усилия продавливания на прямолинейных участках при перезапуске процесса продавливания после кратковременных остановов. Она выражается суммой концевого и остаточного усилий. Используется упрощенный вид зависимости прочности на сдвиг по контакту «обделка-порода» от смещений обделки. Получены аналитические выражения для граничных значений нажимных усилий, что позволяет проводить более точный анализ чувствительности значений нажимных усилий к изменениям параметров продавливания.

Ключевые слова: усилие продавливания, тоннельная обделка, остановы, усилие при перезапуске, МТПК, прочность на сдвиг, зона с процессами, ослабленная зона.

Введение

Сравнительный анализ различных подходов к оценке усилий продавливания показывает, что практически все они основаны на методе предельного равновесия, когда фрикционная составляющая усилия продавливания вычисляются с учетом действия постоянного по длине продавливаемой обделки сопротивления трения по контакту «обделка-порода-смазочный материал» (напр., [1]). При этом, не учитывается наличие коридора значений нажимных усилий, образованного разницей огибающей средних максимальных значений и огибающей средних минимальных значений. Такой коридор возникает при перезапуске процесса продавливания после кратковременных

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 82–87.
© 2017. И.И. Шорников.

остановов (до 1–2 ч). Ширина коридора может достигать значений до 2000 кН [2–4].

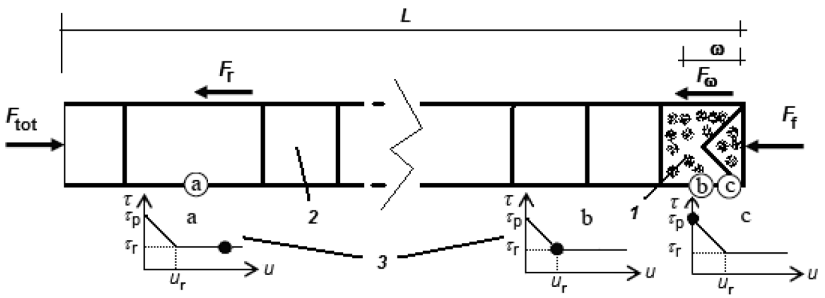
Настоящая статья является продолжением работы [5] с целью получения аналитических зависимостей нажимных усилий от параметров продавливания, что позволяет проще проводить анализ чувствительности значений нажимных усилий к изменениям значений этих параметров.

Метод оценивания нажимного усилия

Традиционно полное усилие продавливания F_{tot} подразделяется на две составляющие: забойную – F_f и фрикционную F_{fr} [1–5]. Аналогом процесса формирования фрикционной составляющей усилия продавливания является механизм постепенного оползания откосов [6, 7]. Такой механизм для задачи продавливания тоннельных обделок проиллюстрирован на рисунке.

Вдоль контакта обделка-порода длиной L образуется полоса сдвига, которую по длине обделки целесообразно разделить на два участка, как это делается при оценке устойчивости откосов при их постепенном оползании [6, 7].

На рассматриваемой стадии нагружения в точке a и в области, окружающей ее, полоса сдвига находится в критическом состоянии с постоянным по длине значением остаточной прочности на сдвиг τ_r. Такую зону обычно называют ослабленной зоной [6]. В точке c с пиковым значением прочности τ_p и за ней, в области вне критического состояния породы в полосе сдвига (с точками b и c) длиной ω, имеет место режим разупрочнения. В точке b достигается остаточная прочность τ_r при продольном смещении u, равном u_r. Такую зону называют зоной с процессами или концевой зоной [7]. Это также проиллюстрировано на графиках, показывая распределение напряжений сдвига вдоль полосы



Механизм формирования усилия продавливания: 1 – МТПК, 2 – элемент обделки, 3 – диаграммы деформирования τ–u

скольжения. Будем рассматривать область по протяженности, равной длине продавливаемой трубы $L_р$.

Таким образом, фрикционную составляющую усилия продавливания F_{fr} разделим на две составляющие: $F_ω$ – сила сопротивления, определяемая по участку длиной ω по характеристикам диаграммы деформирования $\tau - u$, и $F_г$ – сила сопротивления, определяемая по ослабленной зоне длиной ($L_р - ω$) с остаточной прочностью в критическом состоянии $\tau_г$. Силу сопротивления $F_ω$ назовем «концевым» усилием, а силу $F_г$ – «остаточным» усилием.

Представление характеристик контакта «обделка – породный массив»

В отличие от зависимости $\tau - u$ работы [5] с наличием упругого участка деформирования, будем рассматривать только ее падающий участок с разупрочнением ввиду малости упругого участка (порядка 1–3 мм), как это обычно принимается в литературе [6, 7].

Принимаем зависимость между касательными напряжениями τ и перемещениями u по контакту «порода – продавливаемый элемент» в виде 3-х параметрической зависимости (параметры – $\tau_р$, $\tau_г$, $u_г$) [6, 7]:

$$\tau = \tau_р f(u), \tag{1}$$

где

$$f(u) = \begin{cases} 1 - I_B\left(u / u_r\right), & 0 \le u \le u_r \\ 1 - I_B, & u \ge u_r \end{cases}. \tag{2}$$

Здесь $I_В$ – индекс хрупкости породы Бишопа, равный

$$I_В = ((\tau_р - \tau_г))/\tau_р.$$

Основное уравнение и его решение

Подобно выводу основного уравнения работы [5] будем иметь дифференциальное уравнение для продольных смещений υ

$$\frac{d^2 v}{d\xi^2} - \beta^2 f(v) = 0\,. \tag{3}$$

Вводятся безразмерные величины таким образом, чтобы $u = \upsilon u_г$; $x = \xi L_р$; $\omega = \omega\,\widehat{\omega}\,L_р$; $\beta^2 = (L/L_*)^2$, а также характеристическая длина

$$L_* = \sqrt{E_t A_r u_r / A_s\left(\tau_p - \tau_r\right)}\,,$$

где E_t – эффективный модуль упругости обделки с учетом жесткости кольцевой прокладки в стыке между трубами (кН/м^2); $A_г$ –

площадь сечения трубы, (м^2); A_s – площадь контакта в системе «труба-порода» на 1 м тоннеля (м^2/м). Обозначим $1/I_В$ через $i_В$.

Продольные усилия представляются в виде

$$N = -\frac{E_t A_r u_r}{L}\frac{d\upsilon}{d\xi}. \qquad (4)$$

Для раскрытия существенных черт поведения обделки при продавливании в рамках рассматриваемого метода рассмотрим характеристики поведения при нагружении части щита длиной $L_р$ от забоя жестким нагружающим устройством. Поэтому граничные условия берутся в виде

$$\begin{cases} \xi = 0 \quad v = v_0, \\ \xi = 1 \quad \dfrac{dv}{d\xi} = 0. \end{cases} \text{ при } \xi = 1 - \widehat{\omega},\ v = 1. \qquad (5)$$

В дополнение к (3) и (5) для двух названных областей имеем, что

$$f(v) = \begin{cases} 1 - I_B, & 0 \le \xi \le 1 - \widehat{\omega} \\ 1 - I_B v, & 1 - \omega \le \xi \le 1 \end{cases}. \qquad (6)$$

Продольное смещение v на забое обозначим через v_L.

При $v_0 \le 1$ ослабленная зона отсутствует, и решение имеет вид:

$$v(\xi) = i_B - (i_B - v_0)\frac{\cos\{\alpha(1-\xi)\}}{\cos\alpha}. \qquad (7)$$

Здесь

$$\alpha = rI_В,\ r = L_p\sqrt{A_s\tau_p \,/\, E_t A_r u_r}\ .$$

Тогда безразмерное усилие n_0 при $\xi = 0$ будет равно:

$$n_0 = -\left.\frac{dv}{d\xi}\right|_{\xi=0} = (i_B - v_0)\,\alpha tg\alpha \qquad (8)$$

Отсюда видно, что усилие линейно спадает при увеличении смещений v_0. Максимальное значение этой величины при $v_0 = 0$ будет

$$n_{0m} = rtg\{rI_B\}.$$

При $v_0 > 1$ появляется ослабленная зона ослабленная зона. При этом, получим значение безразмерного усилия

$$n_{0r} = r(1 - I_B)tg\{rI_B\}.$$

Как показали расчеты, эта величина практически остается неизменной при дальнейшем увеличении смещений v_0. Тогда ширина коридора значений безразмерных нажимных усилий определится выражением

$$\Delta n = n_{0m} - n_{0r} = rI_B \operatorname{tg}\{rI_B\},$$

что соответствует размерному усилию

$$\Delta N = F_\omega - F_r = \sqrt{E_t A_r A_s \tau_p u_r} \cdot I_B\, tg\{rI_B\}. \qquad (9)$$

Для конкретного примера, приведенного в списке литературы работы [2], где $\tau_p = 400$ кПа, $E_t = 5 \cdot 10^4$ МПа (с кольцом в стыке из фанеры толщиной 1,5 см), $L_p = 2{,}0$ м, величина $r \approx 0{,}3$. Тогда приближенно

$$\Delta N \cong A_s \tau_p L_p I_B^{\,2}. \qquad (10)$$

Эта зависимость объясняет большое значение ширины коридора значений нажимных усилий при перезапуске процесса продавливания, например, для жестких лондонских глин с $I_B \approx 0{,}7$ и его низкие значения для мягких глин и песков с малыми значениями индекса хрупкости I_B [2]. В этих последних случаях можно определять нажимные усилия от домкратной станции обычным способом по остаточной прочности по контакту обделка-порода τ_r.

Выводы

В работе дается вывод соотношения для диапазона изменения нажимного усилия от минимального до максимального его значения при перезапуске процесса продавливания. Величина этого диапазона определяется площадью контакта щит-порода, пиковым значением прочности на сдвиг и индексом хрупкости породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коллекторы* и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемке работ. СТО НОСТРОЙ 2.17.66-2012. – М.: Изд-во «БСТ», 2013. – 101 с.

2. *Milligan G. W. E., Norris P.* Pipe-soil interaction during pipe jacking // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 1999. Vol. 137. Iss. 1. Pp. 27–44.

3. *Microtunneling* and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recomendations / French Society for Trenchless Technology. – London: ISST Ltd, 2006. – 343 p.

4. *Sheil B. B.*, *Curran B. G.*, *McCabe B. A.* Experiences of utility microtunnelling in Irish limestone, mudstone and sandstone rock // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 51. Pp. 326–337.

5. *Шорников И. И.* Прогнозирование усилий продавливания обделки тоннелей на прямолинейных участках: стационарная теория // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 12. – С. 333–341.

6. *Палмер А., Райс Дж.* Рост поверхностей скольжения при постепенном оползании переуплотненной глины // Механика. Сборник переводов. – 1974. – № 6(148). – С. 104–125.

7. *Puzrin A. M.*, *Germanovigh L. N.* The growth of shear bands in the catastrophic failure of soils // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2005. Vol. 471. No.2175. Pp. 1–25. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Шорников Иван Игоревич – кандидат технических наук, доцент, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: shornicovivan@gmail.com.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 82–87.

UDC 622.02: 624.1

I.I. Shornikov

JACKING FORCES PREDICTION FOR TUNNEL LINING IN MICROTUNNELLING: BOUNDARY VALUES ESTIMATION

The method of estimation of values of the thrust forces operating from a jack station is resulted, for tunnel lining jacking in microtunnelling. Their boundary values are estimated: maximum and minimum. Estimation is spent for a frictional component of thrust forces on rectilinear sites when restarting after short-term stoppages. It is expressed by the sum of end and residual forces. The simplified dependence of shear strength–displacement on contact «lining-soil» is used. Analytical expressions for boundary values of thrust forces are received. The width of corridor of thrust values is proportional to shield-soil contact area, peak shear strength and Bishop coefficient of brittleness of soil. This allows to carry out more exact analysis of sensitivity of values of thrust forces to changes of jacking parameters.

Key words: jacking forces, tunnel lining, stoppage, restarting force, TBM, shear strength, process zone, weakened zone.

AUTHOR

Shornikov I.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: shornicovivan@gmail.com

REFERENCES

1. *Kollektory i tonneli kanalizatsionnye. Trebovaniya k proektirovaniyu, stroitel'stvu, kontrolyu kachestva i priemke rabot. STO NOSTROY 2.17.66-2012* (Sewers and sewer tunnels. Designing, construction, quality supervision and acceptance of works STO NOSTROI 2.17.66-2012), Moscow, Izd-vo «BST», 2013, 101 p.

2. Milligan G. W. E., Norris P. Pipe-soil interaction during pipe jacking. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*. 1999. Vol. 137. Iss. 1, pp. 27–44.

3. *Microtunneling and horizontal drilling: French national project «Microtunnels» recomendations*. French Society for Trenchless Technology. London: ISST Ltd, 2006. 343 p.

4. Sheil B. B., Curran B. G., McCabe B. A. Experiences of utility microtunnelling in Irish limestone, mudstone and sandstone rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 51, pp. 326–337.

5. Shornikov *I. I. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 12, pp. 333–341.

6. Palmer A., Rays Dzh. *Mekhanika. Sbornik perevodov*. 1974, no 6(148), pp. 104–125.

7. Puzrin A. M., Germanovigh L. N. The growth of shear bands in the catastrophic failure of soils. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2005. Vol. 471, no 2175, pp. 1–25.