

УДК 625.731(252.6)

ПРОГНОЗ КОНЕЧНОЙ ОСАДКИ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

Яромко В.Н.

*РУП «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт
«БелдорНИИ», г. Минск, Беларусь*

В силу ряда причин не всегда имеется полная информация о изменении осадок насыпи во времени, что затрудняет прогнозирование сроков стабилизации слабого основания в период строительства. В настоящей статье излагается методика прогнозирования конечных (стабилизированных) осадок по данным кратковременных наблюдений, проведенных после окончания работ по возведению насыпи.

In the force of several reasons a complete information about the measurements of the subsidence's of embankments in time is not always available making it difficult to predict the stabilization time for a weak base in the construction period. In this article the prediction procedure final (stabilized) subsidence's according to short-term monitoring conducted after the completion of the construction of the embankments is explicated.

Введение. В соответствии с ТКП 313-2011 [1] контрольные наблюдения при сооружении земляного полотна на слабых грунтах должны включать систематическое измерение толщины отсыпаемых слоев $h_n(t)$, высоты насыпи $h(t)$ и осадок слабого основания $S(t)$ в заданные моменты времени t . По результатам этих измерений устанавливают:

- соответствие фактического режима отсыпки проектному;
- соответствие строительной высоты насыпи h_o фактически отсыпанной высоте насыпи $h(t)$;
- соответствие расчетной осадки $S_{расч}$ фактической $S(t)$;
- фактические объемы работ по отсыпке нижней части насыпи;
- сроки устройства дорожной одежды.

Однако, если нет полного ряда измеренных осадок, то возникает проблема прогнозирования конечных осадок и сроков устройства дорожной одежды.

Математическая модель консолидации слабого основания.

Для восстановления упущенных осадок и построения полной кривой консолидации, необходимо знать закономерность изменения осадки (ядро консолидации) во времени. Ядро консолидации или функцию времени $K(t)$ выбирают феноменологическим путем.

В механике грунтов наибольшее распространение получили степенная, логарифмическая и дробно-линейная зависимости [2–5]. Автором показано, что для болотных грунтов наиболее пригодным является ядро консолидации, описываемое дробно-линейной (гиперболической) зависимостью вида [6]:

$$K(t) = \frac{T}{(T+t)^2}, \quad (1)$$

где T – консолидационный параметр, характеризующий скорость затухания осадки и имеющий размерность времени.

Физический смысл параметра T легко установить, если из (1) определить степень консолидации:

$$U = \int_0^t K(t) dt = \int_0^t \frac{T dt}{(T+t)^2} = \frac{t}{T+t}, \quad (2)$$

Из последнего уравнения видно, что при $t = T$ происходит 50 % осадки ($U = 0,5$), т.е. параметр T это время, необходимое для достижения 50 % конечной осадки $S(\quad)$.

Таким образом, осадка основания в любой момент времени равна:

$$S(t) = U S(\quad) = S(\quad) \frac{t}{T+t}. \quad (3)$$

Пригодность дробно–линейного ядра консолидации (1) и зависимости (3) для описания осадок консолидации устанавливают путем преобразования переменных таким образом, чтобы они были связаны линейной зависимостью вида

$$y = Kx + b . \quad (4)$$

Выпрямленная таким образом зависимость (4) является линейной относительно переменных y и x , а ее параметрами являются K и b .

Для приведения зависимости (3) к виду (4) разделим обе части уравнения (3) на t и выполним соответствующие преобразования

$$\frac{t}{s(t)} = \frac{T+t}{s(\)} = \frac{t}{s(\)} + \frac{T}{s(\)} . \quad (5)$$

Принимая $t/S(t) = Y$; $t = x$, получим:

$$K = 1/S(\) \text{ и } b = T/S(\) . \quad (6)$$

Таким образом, зависимость (3) выравнивается (выпрямляется) в координатах $t/S(t)-t$. Графики зависимости (3) в обычных и преобразованных координатах приведены на рисунке 1.

Определив на выпрямленной кривой по графику (рисунок 1) обычным способом коэффициент $K = \operatorname{tg}\alpha$ и параметр b как отрезок, отсекаемый прямой на оси $t/S(t)$, можно вычислить конечную (стабилизированную) осадку $S(\)$

$$S(\) = 1/K \quad (7)$$

и консолидационный параметр

$$T = bS(\) = b/K. \quad (8)$$

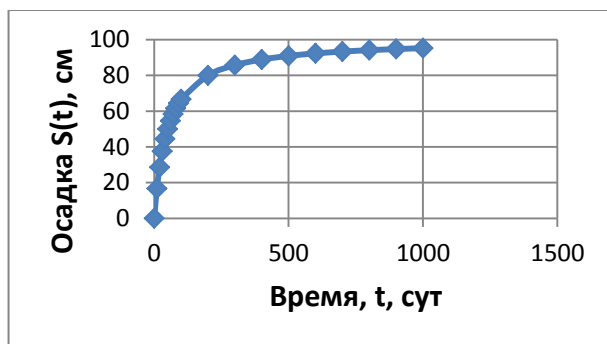
Таким образом, располагая данными наблюдений за осадками, можно путем построения графика в координатах $t/S - t$ определить конечную осадку основания $S(\)$ и консолидационный параметр T ядра консолидации (1). Это позволяет в период строительства прогнозировать величину конечной осадки $S(\)$, а на стадии проектирования по известным значениям $S(\)$ и T прогнозировать ход развития осадки во времени.

Зависимость (3.20) можно представить также в виде:

$$S(t) = \frac{t}{b+Kt} . \quad (9)$$

Эту зависимость ранее использовали А.А. Ничипорович, В.Г. Булычев, Л.С. Амарян, А.С. Королев и др. [2,3] для аппроксимации осадок различных сооружений на глинистых, пластично-мерзлых и торфяных грунтах. Ядро интегрального уравнения в виде дробно – линейной зависимости (1), по-видимому, впервые было предложено Ю.К. Зарецким [4] и несколько позже использовано С.С. Вяловым [5]. Автором предложена более общая интерпретация этой зависимости и определены численные значения входящих в нее параметров применительно к натурным условиям консолидации из болотных грунтов при сооружении дорожных насыпей [6].

a



б

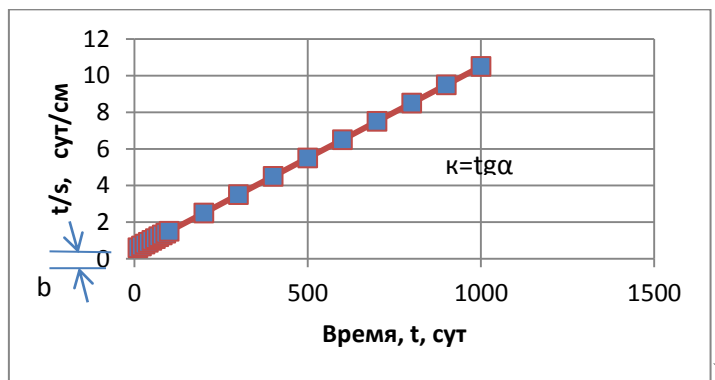


Рис. 1. Аппроксимация кривой осадки (а) дробно-линейной функцией (б)

Инвариантность показателя $S_i(\) T_i(\) = \text{const}$. Прежде чем перейти к решению поставленной задачи, рассмотрим взаимосвязь между параметрами $S(\)$ и $T(\)$ для случая действия ступенчатой нагрузки интенсивностью $P(t) = P = \text{const}$.

Зависимость (3) можно представить в виде линейного графика в координатах $t/S(t) - t$ (рисунок 2). Прямая 1 характеризуется наклоном $1/\text{tg}\alpha = S(\)$ и отсекает на оси t отрезок равный $T(\)$. Если начало отсчета времени взять не в момент $t = 0$, а в любой другой момент, например $t = \tau_0$, то зависимость осадки от времени будет характеризоваться графиком (рис. 2а) с новыми параметрами $S_i(\)$ и $T_i(\)$. Поскольку в момент времени $t = \tau_0$ произойдет осадка $S(\tau_0)$, то новые параметры $S_i(\) < S(\)$ и $T_i(\) > T(\)$. При этом можно доказать, что для любого момента времени t_i существует зависимость:

$$S(\) T(\) = S_i(\) T_i(\). \quad (10)$$

Для доказательства равенства (10) рассмотрим скорости осадок для графиков 1 и 2 соответственно в моменты времени $t = 0$ и $t = \tau_0$. Скорость осадки основания, подчиняющаяся зависимости (3), определяется следующей формулой:

$$v(t) = \frac{S(\)T(\)}{[T(\)+t]^2}. \quad (11)$$

Исходя из этого, для графика осадки 1 получим:

$$v = \frac{S(\)}{T(\)}, \text{ при } t = 0;$$

$$v = \frac{S(\)T(\)}{[T(\)+\tau_0]^2}, \text{ при } t = \tau_0;$$

Аналогично для графика 2 получим:

$$v_i = \frac{S_i(\)}{T_i(\)}, \text{ при } t = \tau_0 - \tau_0;$$

$$v_i = \frac{S_i(\)T_i(\)}{[T_i(\)-\tau_0]}, \text{ при } t = -\tau_0.$$

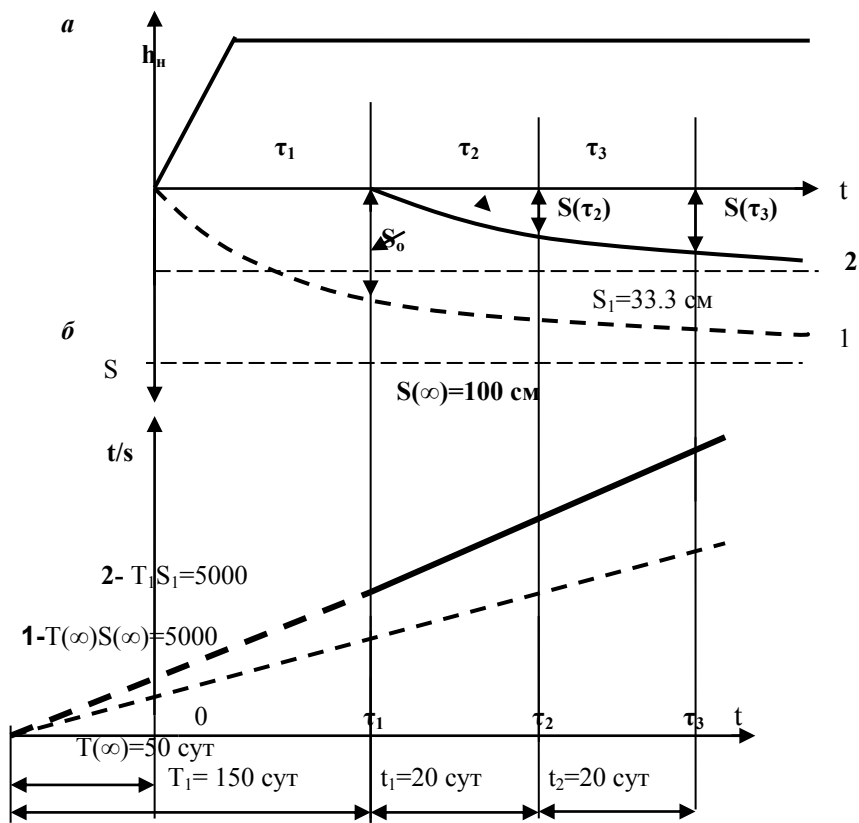


Рис. 2. Схемы к выводу инвариантности показателя $S_i(\infty) T_i(\infty)$:
a, б – соответственно графики изменения нагрузки, осадки
и обратной величины средней скорости осадки во времени

Учитывая, что для соответствующих моментов времени скорости осадок должны быть равны между собой, получим следующую систему уравнений:

$$\frac{S_i(t)}{T_i(t)} = \frac{S_i(\infty) T_i(\infty)}{[T_i(t) - \tau_0]^2}; \quad (12)$$

$$\frac{S_i(t)}{T_i(t)} = \frac{S(\infty) T(\infty)}{[T(t) + \tau_0]^2}. \quad (13)$$

Выразив из (12) $S_i(t)$ и подставив полученное значение в (13), получим:

$$S_i(t) T_i(t) = \frac{S(t)}{T(t) + T_i^2(t)} [T_i(t) - \tau_0] [T(t) + \tau_0]^2. \quad (14)$$

Из уравнения (14) видно, что правая часть будет равна $S(t)$ $T(t)$ только в том случае, если $T(t) + \tau_0 = T_i(t)$ и $T_i(t) - \tau_0 = T(t)$.

Тогда:

$$S(t) T(t) = \frac{S(t)}{T(t) + T_i^2(t)} T^2(t) T_i^2(t) = S(t) T(t).$$

Следовательно, мы доказали, что $T_i(t) = T(t) + \tau_0$. Подставляя это значение в уравнение (12) или (13) получим:

$$S(t) T(t) = S_i(t) T_i(t) = \text{const}. \quad (15)$$

Таким образом, для основания, зависимость «осадка-время» которого описывается уравнением (3), произведение параметров $S_i(t) T_i(t)$ является величиной постоянной для любого момента времени t_i . Естественно, что для каждого момента времени t_i параметры $S_i(t)$ и $T_i(t)$ будут различными, но в силу зависимости (15) их произведение будет величиной постоянной.

Инвариантность произведения $S_i(t)$ и $T_i(t)$ была доказана для случая мгновенного приложения ступенчатой нагрузки. Исходя из допущения о линейности связи между деформациями и напряжениями и вытекающим из этого законом суперпозиции (наложения), следует вывод о независимости консолидационных характеристик от характера воздействия, т. е. закона нагружения слабого основания. Величина константы $S_i(t) T_i(t) = W$ может быть названа сопротивлением консолидации слабого основания.

Прогноз конечной осадки насыпи на слабом основании. Используя полученную закономерность $S_i(t) T_i(t) = W$, представляется возможным прогнозировать конечную осадку насыпи на слабом основании. Для этого необходимо после возведения насыпи на заданную высоту провести измерения осадок в моменты времени τ_1, τ_2, τ_3 для построения зависимости $t/s-t$ (рисунок 2 б, прямая 2), вычислить сопротивление консолидации W по формуле $W = S_1 T_1$, упущенную осадку $S = S(t) - S_1$ и определить конечную осадку путем решения уравнения (16):

$$S(\infty) = \frac{W}{T(\infty)} = \frac{\tau_3 - \tau_2}{\frac{T_1 + \tau_1 - T(\infty)}{S(\tau_3) + S} - \frac{T_1 - T(\infty)}{S}} \quad (16)$$

относительно параметра $T(\infty)$ с ограничением $W/W_1 = 1,0$:

$$T(\infty) - \frac{W}{(\tau_3 - \tau_2) \left(\frac{T_1 + \tau_1 - T(\infty)}{S(\tau_3) + S} - \frac{T_1 - T(\infty)}{S} \right)} = 0. \quad (17)$$

Затем вычисляют искомое значение конечной осадки

$$S(\infty) = \frac{W}{T(\infty)}, \quad (18)$$

где W – сопротивление консолидации (см·сут); S_1 и T_1 – соответственно конечная осадка и консолидационный параметр слабого основания для интервала времени $\tau_1 - \tau_3$.

Параметры S_1 и T_1 вычисляют по формулам:

$$S_1 = \frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_3/S(\tau_3) - \tau_2/S(\tau_2)}; \quad (19)$$

$$T_1 = \left(\frac{S_1}{S(\tau_2)} - 1 \right) \tau_2, \quad (20)$$

где $S(\tau_3)$ и $S(\tau_2)$ – соответственно осадки в моменты времени τ_3 и τ_2 . (рис. 2, б).

Заключение. Применительно к математической модели консолидации насыпи на слабом основании с использованием гиперболического ядра консолидации установлена инвариантность произведения конечной осадки основания на консолидационный параметр основания ($W = S_i T_i = \text{const}$) для любого момента времени. Эта закономерность позволяет по данным сокращенных наблюдений за осадками (после возведения насыпи) прогнозировать их конечную величину.

Литература

1. Автомобильные дороги. Земляное полотно. Правила устройства : ТКП 313-2011 (02191).

2. Ничипорович, А.А. Прогноз осадок гидротехнических сооружений на связных грунтах / А.А. Ничипорович, Т.И. Цыбульник. – М. : Госстройиздат, 1961.

3. О методике расчета консолидации слабых водонасыщенных грунтов / В.Г. Булычев [и др.] : Материалы Всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных глинистых грунтах. – Таллин, 1965.

4. Зарецкий, Ю.К. О реологических свойствах пластично-мерзлых грунтов и определении осадки штампа во времени / Ю.К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1972. – № 2.

5. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М. : Высш. шк., 1978.

6. Автомобильные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования : ТКП 200-2009 (02191).