

2. **ГОСТ 12248–2010.** Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 71 с.
3. **ГОСТ 20522–96.** СП 22.13330–2011. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1997.
4. **Механика грунтов** / Н. А. Цытович. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 636 с.
5. **Статика** сыпучей среды / В. В. Соколовский. – Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 240 с.
6. **СП 22.13330–2011.** Основания зданий и сооружений. – Москва, 2011.
7. **РД 31.31.24–81.** Рекомендации по проектированию причальных сооружений, возводимых по способу «стена в грунте». – Москва, 1981.
8. **СНиП 2.06.05–84.** Плотины из грунтовых материалов. – Москва, 1991.

УДК 528-482

Н. Н. Богомолова

Петербургский государственный университет путей сообщения

ПРЕДРАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Предложен алгоритм расчета требуемой точности геодезических работ при наблюдениях за деформациями зоны выработки во время сооружения транспортных тоннелей. Рассмотрены вопросы назначения точности при наблюдениях за деформациями в горизонтальной и вертикальной плоскости. Представлены результаты расчетов и выводы.

геодезический мониторинг деформаций, транспортные тоннели, назначение точности.

Введение

Увеличение темпов роста освоения подземного пространства в России в последние годы связано с совершенствованием отечественных технологий тоннелестроения. Лишь в рамках реализации программы по подготовке к зимним Олимпийским играм в Сочи строится более 40 км тоннелей. Строительство проходит в сложных геологических условиях, связанных с высокой тектонодинамической активностью, сейсмичностью и экзогенными проявлениями.

Согласно [1], изучаемая нами территория находится в восьмибалльной зоне сейсмической интенсивности по карте ОСР-97-А. Эти факторы существенно влияют на развитие и активизацию оползневых процессов, что представляет потенциальную угрозу безопасности ведения работ при строительстве транспортных тоннелей. Необходимость ор-

ганизации безопасного строительного процесса в строго регламентированный срок объясняет актуальность разработки методики мониторинга деформаций при строительстве тоннелей.

Как правило, в зоне выработки реакция грунтового массива на производство проходческих работ проявляется в виде деформационных процессов, протекающих в зоне лба забоя, внутри выработки и в конечной обделке тоннеля, отстающей от забоя на установленную проектом величину.

Следует отметить, что современная геотехническая аппаратура (тензодатчики, экстензометры, наклонометры и пр.) позволяет реализовывать мониторинг деформаций впереди забоя, обеспечивая сбор данных о грунтовых характеристиках, опережающих проходку, без применения геодезических средств измерений. Поэтому основные этапы работы при реализации наблюдений за

смещениями выработки сводятся к следующему перечню:

- 1) измерение смещений контура выработки;
- 2) определение смещений положения конечной обделки.

1 Предрасчет точности наблюдений за смещениями временной крепи и конечной обделки

Расчет наблюдений за смещениями в зоне выработки предлагается производить исходя из величины критической деформации конечной обделки тоннеля, которую следует принять равной допустимому отклонению фактического положения от проектного, т. е. 50 мм в плане и по высоте [2]. Для определения величины средней квадратической погрешности (СКП) определения критической деформации в зоне выработки воспользуемся формулой [3]:

$$m_{\Phi_{кр}} = \Phi_{кр} / 2t,$$

где $m_{\Phi_{кр}}$ – СКП определения критической деформации; $\Phi_{кр}$ – величина критической деформации; t – нормированный коэффициент, зависящий от уровня доверительной вероятности и закона распределения; множитель 2 в знаменателе необходим для обеспечения строительного запаса в момент наступления критической деформации (его величина может варьироваться в зависимости от уровня ответственности производимых работ от 1 до 3) [3].

Согласно формуле СКП определения критической деформации составит 8 мм.

Величина перемещений δ в горизонтальной плоскости определяется по формуле

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2};$$

$$\delta_x = x_{i+1} - x_i; \quad \delta_y = y_{i+1} - y_i,$$

где x_{i+1}, y_{i+1} – координаты деформационной марки в цикле $(i + 1)$; x_i, y_i – координаты марки в предшествующем цикле измерений.

СКП m_{δ} горизонтального смещения определяется следующим образом:

$$m_{\delta} = \sqrt{(2m_x^2 + 2m_y^2)},$$

где m_x, m_y – СКП координат x и y соответственно.

Применим принцип равного влияния погрешностей:

$$m = 2m_x = 2m_y.$$

На основании заданной величины СКП горизонтального смещения установим, что величина СКП $m_{x,y}$ координат будет равна 4 мм. Тогда погрешность m_p положения деформационной марки будет $m_{x,y} \sqrt{2} = 5,6$ мм.

Координаты деформационных марок, закрепленных на временной крепи и конечной обделке, предлагается определять полярным способом с пунктов плановой мониторинговой сети, проложенной методом полигонометрии. При этом СКП m_p положения деформационной марки определяется по формуле

$$m_p = \sqrt{m_{p_{изм}}^2 + m_{p_{исх}}^2},$$

где $m_{p_{исх}}$ – погрешности исходных данных; $m_{p_{изм}} = m_{пс}$ – погрешности полярного способа.

Рассмотрим возможное соотношение этих величин при мониторинге выработки. Логично предположить, что при наблюдениях за смещениями выработки постоянство схемы работ сведет к минимуму влияние погрешностей исходных данных. Определение координат деформационных марок с одних и тех же пунктов мониторинговой сети, при прочих равных условиях, позволит определять величины смещений контура выработки достоверно, даже если пункты сети имеют ошибки. С другой стороны, пункты мониторинговой сети, расположенные в тоннеле, могут быть подвержены деформациям, возникает очевидная необходимость контроля их стабильности. При осуществлении контроля стабильности пунктов, которые имеют значительные погрешности, могут возникнуть определенные трудности.

Рассмотрим другой подход, при котором погрешности исходных данных пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями измерений. В этом случае облегчается задача контроля стабильности пунктов мониторинговой сети. Значение СКП определения пунктов сети – 1,8 мм. Для тоннеля протяженностью 1 км такая точность определения самого слабого пункта потребует применения высокоточных геодезических приборов или сложного состава работ, что, однако, никак не повлияет на точность при определении смещений контура выработки.

Предлагается, при установлении соотношения между погрешностями исходных данных и погрешностями измерений, воспользоваться принципом равного влияния погрешностей. Тогда погрешности $m_{\text{исх}}$ исходных данных и погрешности $m_{\text{изм}}$ измерений будут равны 4,0 мм.

СКП положения деформационных марок полярным способом определяется по формуле [3]:

$$m_{\text{пс}} = \sqrt{m_d^2 + d^2 m_\alpha^2 \frac{1}{\rho^2}},$$

где m_d – СКП линейных измерений; m_α – СКП угловых измерений; d – измеренное расстояние; $\rho = 206265$ – число секунд в радиане.

В соответствии с принципом равного влияния линейных и угловых погрешностей, получим

$$m_{\text{пс}} = \sqrt{2} m_d; \quad m_{\text{пс}} = \sqrt{2} d m_\alpha \frac{1}{\rho}.$$

С учетом стесненных условий работ в зоне выработки, значительного ухудшения видимости вследствие работы буровых машин, примем для дальнейших расчетов, что с одного пункта мониторинговой сети должна быть обеспечена видимость на деформационные марки, удаленные на 100 м. Тогда расстояние между пунктами сети не должно превышать 200 м.

На основе принципа равных влияний погрешностей определим, что СКП m_d расстояний составит 2,8 мм, а СКП m_α угловых измерений будет равна 5,8".

2 Проектирование плановой мониторинговой сети в тоннеле

Задача проектирования сети до недавнего времени решалась при помощи приближенных формул, однако современные программные комплексы позволяют дать априорную оценку точности сети при помощи моделирования. Как правило, процесс оценки проекта сети начинают с составления схемы сети, на которую наносят исходные пункты, определяемые пункты и измеряемые элементы: горизонтальные направления, длины сторон хода. Далее назначают СКП результатов измерений и дают оценку проекта по методу наименьших квадратов.

По результатам уравнивания можно сделать вывод о том, обеспечивается или не обеспечивается требуемая точность положения пунктов сети.

Возможными вариантами для улучшения результатов оценки точности проекта могут служить повышение точности измерения элементов сети (углов и расстояний) и изменение состава измерений.

3 Измерение смещений контура выработки

Во время проходческих работ, до начала бетонирования конечной обделки, нагрузка массива грунта в зоне выработки удерживается временной крепью. Наиболее часто в качестве временного крепления используют стальные рамы, арки или балки, набрызг-бетон в сочетании с армированными сетками (в зависимости от параметров проходки). Смещения, происходящие в поперечной плоскости тоннеля и распространяющиеся как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, предлагается определять электронными тахеометрами в контрольных точках, закрепленных отражательными пленками. Отражательные пленки крепятся на металлические пластины, которые, в свою очередь, привариваются к временной крепи (арки, рамы или армосетки) арматурными стержнями (длиной около 20 см). Частота установок деформационных марок на

временную крепь зависит от длины заходки, определенной проектом. Очевидно, что марки должны быть закреплены на каждой заходке и нулевой цикл измерений должен быть произведен сразу же после монтажа временной крепи. Такая модель измерений позволяет оценивать сжатие выработки не только по относительным величинам, но и по абсолютным значениям координат деформационных марок. На рис. 1 представлена схема расположения деформационных марок в одном из сечений строящегося тоннеля («Дублер Курортного проспекта») в г. Сочи.

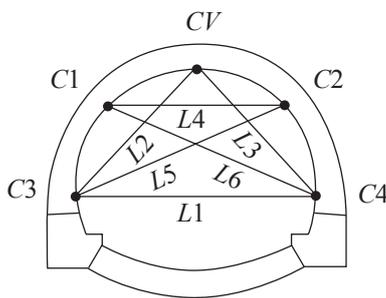


Рис. 1. Определение деформаций выработки: C1, C2, C3, C4, CV – деформационные марки

В результате очередного цикла измерений смещений можно получить следующие сведения о деформационных процессах, происходящих в зоне выработки: поперечное сжатие, осадка временной крепи, смещение в плане и скорость деформаций.

Вычисляя величины расстояний $L_1 - L_6$, используя координаты марок, можно установить не только величину сжатия, но и его направление. Величина продольного сдвига определяется по формуле

$$\theta = x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha,$$

где α – дирекционный угол направления оси тоннеля.

Изменение величины продольного сдвига может быть представлено в виде графика (рис. 2).

Величина поперечного сдвига в i -м цикле измерений определяется по формуле

$$\mu = x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha$$

и может быть представлена в виде графика (рис. 3).

4 Особенности измерения смещений конечной обделки тоннеля

Смещения контура конечной обделки предлагается измерять в наиболее уязвимых зонах проходки. Под такими зонами следует понимать разломы, места наиболее глубокого заложения тоннеля, зоны водонасыщенных грунтов, оползневые очаги и др. Границы этих участков выявляются на стадии разработки грунта в выработке в процессе мониторинга деформаций временной крепи. Смещения предлагается фиксировать по изменениям координат деформационных марок (отражательных пленок), закрепленных непосредственно на конечной обделке при помощи электронного тахеометра, установленного на пункте мониторинговой сети.

Нулевой цикл измерений целесообразно выполнять сразу после снятия опалубки. Результаты измерений позволят определить

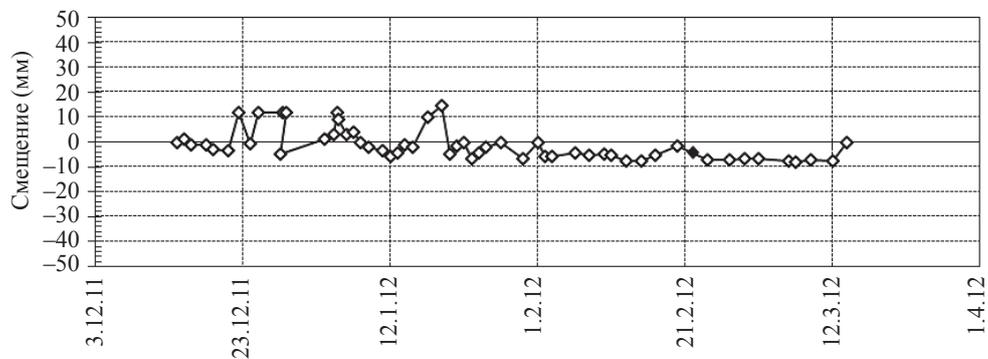


Рис. 2. График изменения деформационных процессов временной крепи строящегося тоннеля (г. Сочи, «Дублер Курортного проспекта»)

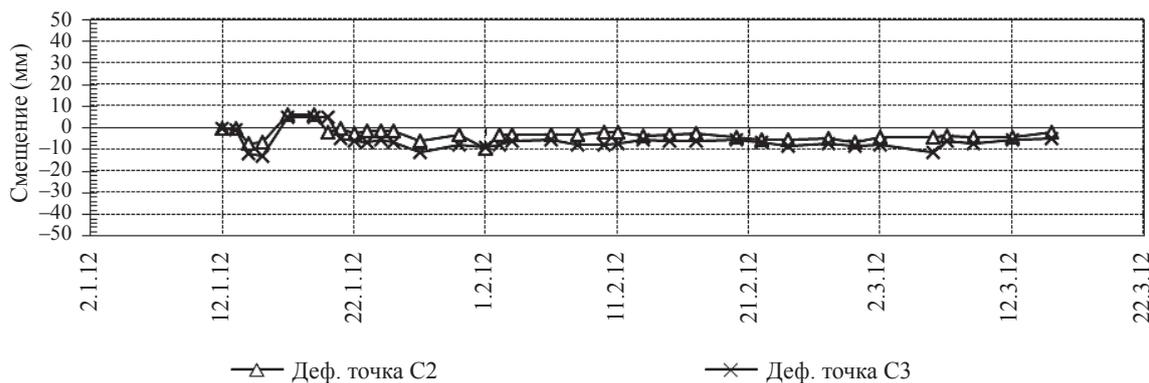


Рис. 3. График деформационных процессов тоннеля (г. Сочи, «Дублер Курортного проспекта»)

следующие виды деформаций конечной отделки: поперечный сдвиг, осадки, смещения в плане и скорость сжатия.

5 Измерение смещений выработки в вертикальной плоскости

Ранее установлено, что величина СКП деформации в вертикальной плоскости 8 мм. С учетом того, что смещение в вертикальной плоскости определяется как разность значений высот из двух смежных циклов, установим величины погрешностей измерений и исходных данных. При ошибках в исходных данных, соизмеримых с ошибками измерений, СКП $m_{H_{исх}}$ положения пунктов исходной высотной сети и СКП $m_{H_{изм}}$ измерений составят каждая 4,0 мм.

Поскольку отметки деформационных марок предлагается определять методом тригонометрического нивелирования, СКП m_h превышения будет

$$m_h = \sqrt{(\sin v)^2 m_s^2 + \left(\frac{S \cos v}{\rho}\right)^2 m_v^2 + \left(\frac{S^2}{2R}\right)^2 m_k^2},$$

где S – расстояние от точки стояния до определяемого пункта; v – угол наклона визирной оси; R – радиус Земли; m_s – СКП расстояния; m_v – СКП угловых измерений; m_k – СКП коэффициента рефракции.

При условии, что предельный угол наклона равен 7° (данная величина рассчитана для случая наблюдений за смещениями сводовой

части железнодорожного тоннеля) и деформационные марки удалены на 100 м, СКП m_s определения расстояния составит 23,6 мм, а СКП m_v угловых измерений – $5,8''$.

Установим требования к точности создания нивелирной сети. В Инструкции по нивелированию I, II, III, IV классов не задается величина СКП определения превышения на станции нивелирования. Будем исходить из величины допустимой невязки, которая определяется по формуле

$$f_h \leq k \text{ мм} \sqrt{L},$$

где k – предельная допустимая ошибка определения превышения на 1 км хода; L – длина хода в км.

Примем, что СКП определения превышения на 1 км будет в 2,5 раз меньше, чем предельная.

Число станций в ходе зависит от величины нормальной длины луча визирования и регламентируется Инструкцией. При нивелировании III класса нормальная длина луча визирования равна 75 м, т. е. 1 км хода будет состоять из 7 станций. Предельно допустимая ошибка k – 10 мм. СКП превышения на 1 км составит 4 мм, а СКП превышения на станции будет в $\sqrt{7}$ раз меньше и составит 1,5 мм. Предположим, что сооружаемый тоннель имеет длину 1 км. Наиболее слабый пункт нивелирного хода будет находиться в середине, т. е. на 4-й станции нивелирования, где СКП положения пункта составит 3,0 мм. Эта величина вполне удовлетворяет требова-

нию $m_{H_{исх}} = 4$ мм. Отметим: заданная точность обеспечивается нивелированием III класса, если длина тоннеля не превышает 1,8 км.

Заключение

Исходя из величины критической деформации тоннеля, равной 50 мм, в статье приведено обоснование того, что пункты плановой геодезической мониторинговой сети должны определяться с погрешностями 4 мм. Положение деформационных марок предложено определять полярным способом с помощью электронного тахеометра. СКП полярного способа – 4,0 мм. Рассмотрены вопросы предрасчета точности геодезических измерений при определении смещений в вертикальной плоскости. Сформулированы требования

к точности создания высотной сети (4 мм), точности выполнения линейных (23,6 мм) и угловых (5,8") измерений при определении высот методом тригонометрического нивелирования.

Библиографический список

1. **СНиП 11-72–81**. Строительство в сейсмических районах. – Введ. 1982-01-01. – Москва : Минстрой России, 1995. – 11 с.
2. **СНиП 32-04–97**. Тоннели железнодорожные и автодорожные: – Введ. 1998-01-01. – Москва : ГУП ЦПП, 1997. – 22 с.
3. **Клюшин Е. Б.** Инженерная геодезия : учебник для вузов / Е. Б. Клюшин, М. И. Киселев, Д. Ш. Михелев, В. Д. Фельдман. – Москва : Изд. дом «Академия», 2004. – 480 с.

УДК 519.872.2

С. И. Гиндин, А. Д. Хомоненко

Петербургский государственный университет путей сообщения

С. Е. Ададунов

ОАО «Росжелдорпроект»

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С РЕКУРРЕНТНЫМ ВХОДЯЩИМ ПОТОКОМ И «РАЗОГРЕВОМ»

Для многоканальных систем массового обслуживания типа $N2/M/M/n$ с гиперэкспоненциальным распределением длительности интервалов между смежными заявками и «разогревом» предлагается расчетная схема вычисления стационарного распределения числа заявок в системе. Приводятся диаграммы переходов и матрицы переходов между микросостояниями системы. Рассматриваются примеры численных расчетов стационарного распределения числа заявок в системе для различных значений коэффициента вариации входящего потока заявок, а также для различных значений интенсивности «разогрева».

система массового обслуживания «с разогревом», гиперэкспоненциальная аппроксимация входящего потока, распределение вероятностей числа заявок.

Введение

Модели многоканальных систем массового обслуживания (СМО) широко используются при исследовании оперативности функционирования сложных систем, в том числе информационных. Основными параметрами

любой СМО являются характеристики потока заявок и механизма обслуживания заявок.

В зависимости от ключевого свойства СМО делятся на одноканальные и многоканальные системы; системы с отказом в обслуживании и системы с ожиданием заявок в очереди; однофазные и многофазные системы;