



Транспортные тоннели из опускаемых секций



Евгений КУРБАЦКИЙ
Evgeny N. KURBATSKIY

Ван Хунг НГУЕН
Van Hung NGUYEN



Курбацкий Евгений Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Нгуен Ван Хунг — аспирант кафедры «Мосты и тоннели» МИИТ, Хань Хоа, Вьетнам.

Представлены преимущества и недостатки тоннелей из опускаемых секций, используемых в транспортных переходах через протяжённые водные преграды (проливы, озёра, широкие реки). Оценивается вариант перехода пролива, который именно с применением опускаемых секций может оказаться наиболее экономичным, надёжным и приемлемым с точки зрения затрат, времени строительства и выбора рациональных технологий. Предлагается метод расчёта тоннелей с учетом сейсмических воздействий.

Ключевые слова: транспортный переход, водные преграды, тоннель, опускаемые секции, балки на упругом основании, преобразование Фурье, сейсмические воздействия, методы расчета.

Традиционно протяжённые транспортные переходы через проливы и широкие реки выполняются с использованием мостов. В некоторых случаях для пропуска высокотоннажных судов приходится располагать пролётные строения на высоких опорах. Это усложняет конструкцию и заставляет удлинять подходы к мостам.

Одним из возможных вариантов решения той же задачи является сооружение тоннеля щитовым способом. Однако и в этом случае существуют требования, из-за которых прибегают к удлинению перехода: тоннель должен располагаться ниже дна водоёма на 25–30 метров и более.

Тоннели из опускаемых секций имеют протяжённость сравнительно меньшую, они расположены на дне водоёмов с небольшим заглублением, а потому подходы к ним могут быть относительно короткими. Длина мостового перехода при пересечении водной преграды на равнинной местности существенно увеличивается (рис. 1 [1]).

Тоннель из опускаемых секций состоит из больших сборных железобетонных или сталебетонных секций. Секции тоннелей

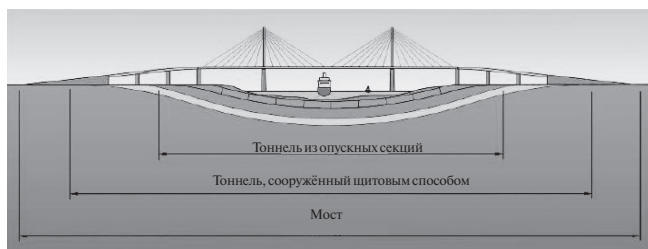


Рис. 1. Сравнение протяженности транспортных переходов через водную преграду.



Рис. 2. Тоннельные элементы в сухом доке.

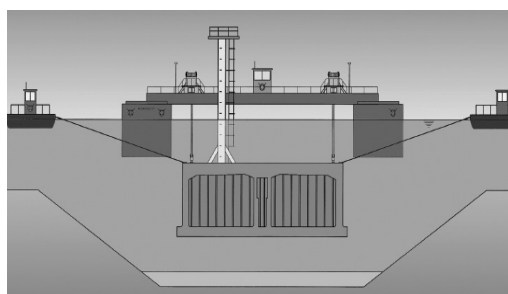


Рис. 3. Схема процесса погружения tunnelной секции в подготовленную траншею.

изготавливаются на стапелях судовой верфи, в сухих доках или во временных котлованах (рис. 2 [2]).

Торцы секции герметизируются временными переборками, после чего котлованы или сухие доки заполняются водой, секции всплывают и их буксируют к месту установки. Затем они погружаются в заранее подготовленную траншею на дне водоема и соединяются с ранее установленными секциями (рис. 3 [1]).

После установки секций тоннеля на дно траншея вокруг него засыпается, и поверхность дна водоема восстанавливается, при этом тоннель должен иметь защитный слой грунта не менее 1,5 м для защиты от тонущих судов и воздействия якорей.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Сейчас в мире эксплуатируется более 100 тоннелей из опускаемых секций различного назначения с разными поперечными сечениями (рис. 4 [1]). Это автодорожные, железнодорожные тоннели, однопутные и двухпутные, а также для одновременного пропуска железнодорожных поездов и автотранспорта.

Действующие транспортные переходы с тоннелями из опускаемых секций свидетельствуют о преимуществе таких проектов по сравнению с другими типами переходов.

1. Детально разработаны все этапы строительства: сооружение секций, их

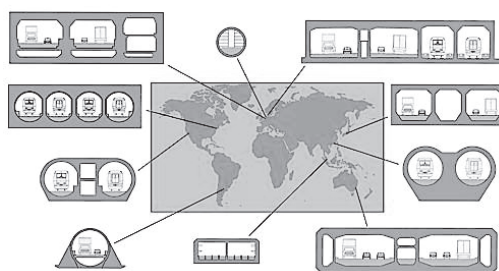


Рис. 4. Типы поперечных сечений тоннелей из опускаемых секций и места их постройки.

транспортировка к месту погружения, способы погружений.

2. Одновременное производство большого количества секций на берегу и совмещение по времени этапов строительства позволяют существенно ускорить процесс создания тоннеля.

3. Идущее в зоне осуществления проекта строительство не оказывает никакого влияния на местное судоходство.

4. Сечение тоннеля из железобетонных опускаемых секций не должно быть обязательно цилиндрическим (как это требуется при щитовой проходке), можно сооружать тоннели с различными формами поперечных сечений и практически при любых типах грунтов, включая и мягкие аллювиальные.

5. При эксплуатации транспортных переходов с такими тоннелями не ограничи-



Рис. 5. Возможные виды деформаций тоннелей при воздействии землетрясений [4].

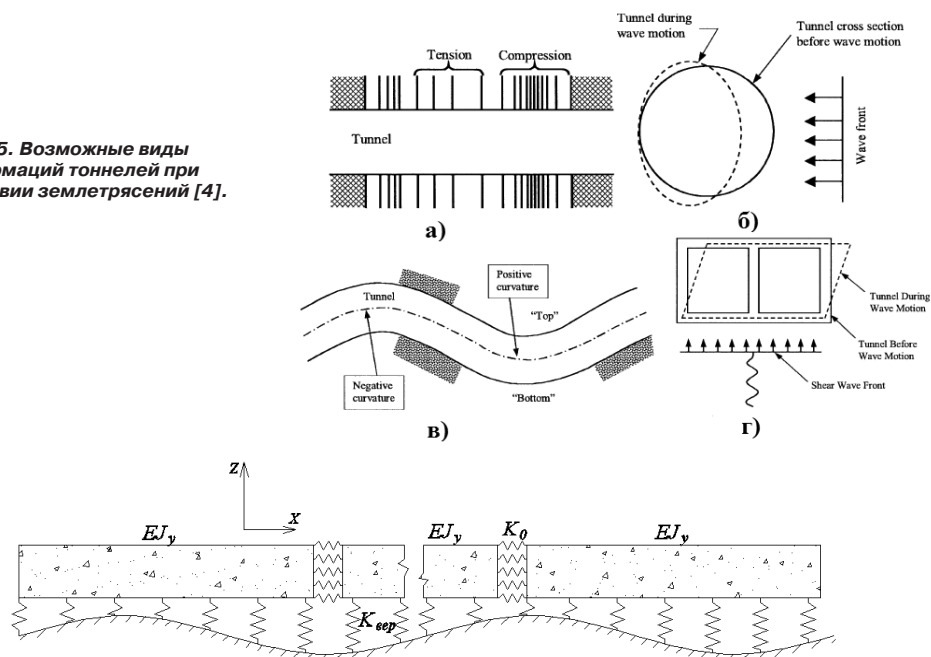


Рис. 6. Расчетная схема.

ваются ни высота, ни тоннаж судов, что освобождает от каких-либо дополнительных организационно-технических трудностей.

6. Тоннели из опускных секций можно сооружать в районах с повышенной сейсмической активностью в сейсмостойком исполнении.

7. Комбинированный транспортный переход с мостом и тоннелем из опускных секций экономически выигрывает у вариантов, где в комбинации с мостом фигурирует тоннель, построенный щитовым способом.

Следует отметить, что тоннели из опускных секций имеют при всем этом и недостатки, которые связаны преимущественно с воздействием на окружающую среду: они могут оказывать негативное влияние на места обитания рыб, изменять течения и уменьшать прозрачность воды.

Но самый главный недостаток на данный момент — отсутствие опыта строительства тоннелей такого типа в РФ, дефицит необходимой техники. Тем не менее пришло время ломать существующие барьеры: в стране большое количество водных (морских и речных) преград, которые нуждаются в технически надежных транспортных переходах, не нарушающих при этом налаженных путей судоходства.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В мягких поверхностных слоях, в которых, как правило, располагаются тоннели из опускных секций, интенсивность сейсмических волн возрастает, поэтому при проектировании конструкций для сейсмических районов следует предусматривать ресурс на сейсмостойкость. Его обеспечивают методы расчета, используемые в практике тоннелестроения [3,4].

При распространении сейсмических продольных и поперечных волн в массиве грунта, где расположен тоннель, могут возникнуть деформации различного вида. Они представлены на рис. 5. Деформации тоннеля на фоне продольных волн даны на рис. 5а и 5б; при возникновении поперечных волн — на рис. 5в (изгиб тоннеля) и 5г (деформация сдвига).

Обычно воздействие продольных волн на тоннели по сравнению с поперечными намного меньше.

НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВОЛНАХ ВДОЛЬ ОСИ

Тоннель предстает в виде отдельных балок на упругом основании, соединённых шарнирами с упругими связями, которые обеспечиваются резиновыми прокладками и кабелями для предварительного напря-

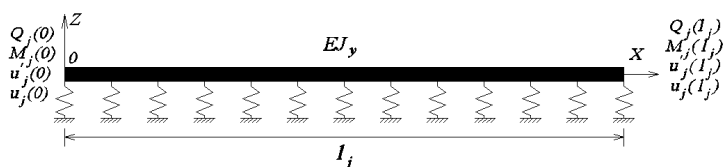


Рис. 7. Локальная система координат j -го элемента.

$$EJ_y (v^4 + 4\beta^4) \tilde{u}_j(v) = KU_0 \left(\frac{e^{-iv_0 L_j} (e^{i(v-v_0)L_j} - 1)}{2(v-v_0)} - \frac{e^{iv_0 L_j} (e^{i(v+v_0)L_j} - 1)}{2(v+v_0)} \right) + Q_j(0) - e^{ivl_j} Q_j(l_j) -$$

$$-ivM_j(0) + ive^{ivl_j} M_j(l_j) - v^2 u_j'(0) EJ_y + v^2 e^{ivl_j} u_j'(l_j) EJ_y + iv^3 u_j(0) EJ_y - iv^3 e^{ivl_j} u_j(l_j) EJ_y.$$

жения [5]. Расчетная схема показана на рис. 6.

Для решения задачи используются интегральное преобразование Фурье и обобщенные функции [6].

Разделим тоннель на n элементов, для каждого используем локальную систему координат (рис. 7).

Дифференциальное уравнение изгиба балки на упругом основании для j элемента [3]:

$$EJ_y \frac{\partial^4 u_j}{\partial x^4} + Ku_j = Ku_g, \quad (1)$$

где K — коэффициент постели основания;

u_j — абсолютное перемещение тоннелей;

$u_g = U_0 \sin(v_0(x+L_j)) (\theta(x) - \theta(x-L_j))$ — функция перемещения грунта при распространении поперечной волны, представленная в виде обобщенной финитной функции;

$\theta(x)$; $\theta(x-L_j)$ — функции Хэвисайда;

U_0 — пиковое значение перемещения массива грунта в месте расположения тоннеля;

$v_0 = (2\pi f/C_s)$ — волновое число, соответствующее сейсмической волне с доминирующей частотой f Гц;

C_s — скорость распространения поперечной волны.

Применив преобразование Фурье к обеим частям уравнения (1), получим (2).

В правую часть уравнения (2) входят функция, описывающая заданное сейсмическое воздействие, а также восемь параметров, представляющих значения прогиба, угла поворота, момента и поперечной силы на торцах секции. Обозначим эту часть уравнения через $\tilde{Q}_j(v)$. Итак, изображение Фурье-функции прогиба j -го элемента определяется по формуле:

$$\tilde{u}_j(v) = \frac{\tilde{Q}_j(v)}{EJ_y (v^4 + 4\beta^4)}; \quad j = 1 \div n, \quad (3)$$

где v — параметр изображения Фурье;

$\tilde{u}_j(v)$ — изображение Фурье-функции

$u_j(x)$;

$\tilde{Q}_j(v)$ — изображение Фурье обобщенной нагрузки $Q_j(x)$;

$$4\beta^4 = \frac{K}{EJ_y}.$$

В соответствии с теоремой Винера-Пэли-Шварца функция $\tilde{u}_j(v)$ должна быть

целой, поэтому числитель, представляющий собой сумму целых функций, содержит в себе нули знаменателя. То есть для каждой секции тоннеля сохраняются четыре условия:

$$\tilde{Q}_j(v_k) = 0, k = 1, 2, 3, 4, \quad (4)$$

где v_k — корни выражения $v^4 + 4\beta^4 = 0$.

Учитывая условия на границах крайних элементов, а также сопряжения элементов между собой, можно получить общую систему алгебраических уравнений, позволяющую определить значения параметров на границах элементов.

Решив систему уравнений, находим значения силовых и кинематических параметров на границах каждой секции. Подставив найденные значения на границах в выражение (3), получим изображение Фурье-функции прогиба каждой секции тоннеля. Для определения функции прогиба следует выполнить обратное преобразование Фурье, используя теорию вычетов.



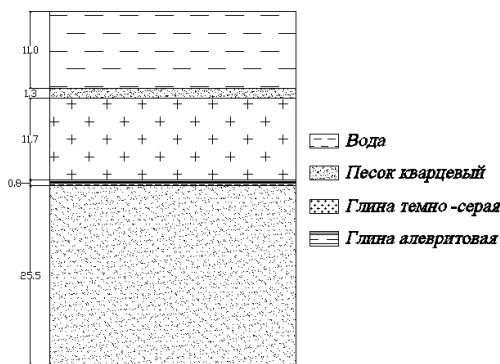


Рис. 8. Геологический разрез массива грунта.

Выражение функции прогиба для каждой секции получено в явном виде. Из-за громоздкости выражения эта формула в данной статье не приводится. Зная выражение функции прогиба, можно определить внутренние усилия в сечении обделки, необходимые для расчёта прочностных параметров.

При сопряжении секций тоннеля между собой учитывается жёсткость резиновых прокладок между секциями.

ПРИМЕР РАСЧЁТА

В качестве такового воспользуемся характеристиками грунтов, соответствующих условиям Керченского пролива [7]. Сечение подводного тоннеля позаимствуем из проекта [8], предусматривающего восемь секций длиной 153 м каждая.

Керченский пролив находится в регионе, который характеризуется высокой сейсмичностью. Здесь возможны землетря-

сения с магнитудой около 7,0 и сейсмичностью 9 баллов и выше. Величины пиковых значений ускорений, скоростей и перемещений в соответствии с данными российских исследователей (Ф. Ф. Аптикаев, Н. Н. Михайлова [9]) имеют следующие значения: $PGA=4 \text{ м/с}^2$; $PGV=0,55 \text{ м/с}$; $PGD=0,2 \text{ м}$.

Характеристики сечения $H=8,7 \text{ м}$; $B=34,5 \text{ м}$; $L_{\text{прок}}=84,4 \text{ м}$; $A_{\text{п.сеч}}=300,15 \text{ м}^2$; $A_{\text{бетон}}=111,64 \text{ м}^2$; $J_y=1314,7 \text{ м}^4$.

Для соединения секций тоннеля между собой учтём резиновые прокладки типа ETS-180-220, которые применены в тоннеле Busan Geoje Fixed Link. Зависимость силы от перемещения вдоль оси тоннеля представлена на рис. 10.

Во время установки секций прокладки получают первоначальное смещение. Первоначальная сила сжатия прокладок зависит от средней глубины положения тоннеля (в рассматриваемом случае 16,5 м). Из исходных данных можем определить начальную нагрузку на резину:

$$F_{\text{начало}} = \frac{\gamma_{\text{вод}} \times h \times A_{\text{п.сеч}}}{L_{\text{прок}}} = \frac{10 \times 16,5 \times 300,2}{84,4} = \frac{587 \kappa \text{Н}}{\text{м}}.$$

Приближенное начальное сжатие резиновой прокладки составляет 9,7 см.

Несмотря на то что поведение прокладок «Gina» существенно нелинейно, на предварительном этапе расчёта можно использовать решения в линейной постановке. Для этой цели следует определить

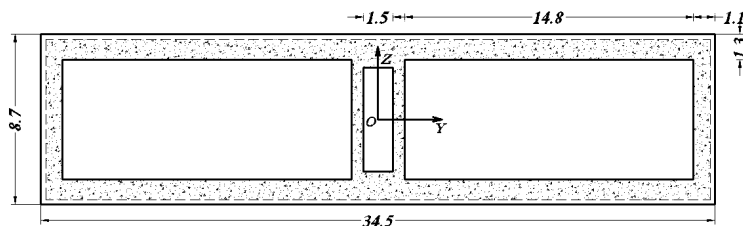


Рис. 9. Поперечное сечение тоннеля.

Таблица 1

Характеристики грунтов

Материал	Плотность (Кг/м³)	Модуль Юнга E (Н/м²)	Коэффициент Пуассона <<Eqn119.eps>>
Песок кварцевый	1500	0,12×10 ⁹	0,3
Глина темно-серая	1600	0,4×10 ⁹	0,35
Глина алевритовая	1600	0,65×10 ⁹	0,35
Железобетон	2500	32,4×10 ⁹	0,15

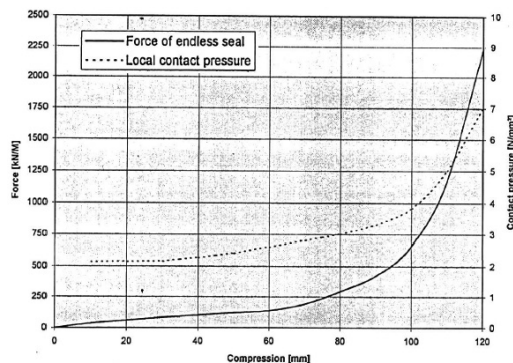
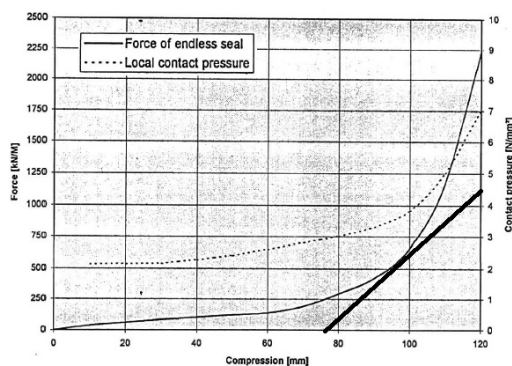


Рис. 10. График зависимости между нагрузкой и сжатием резиновой прокладки (тип ETS-180-220).

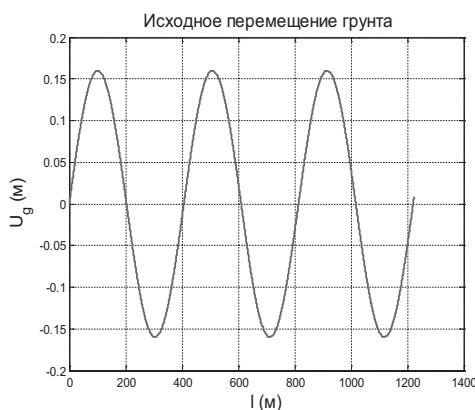
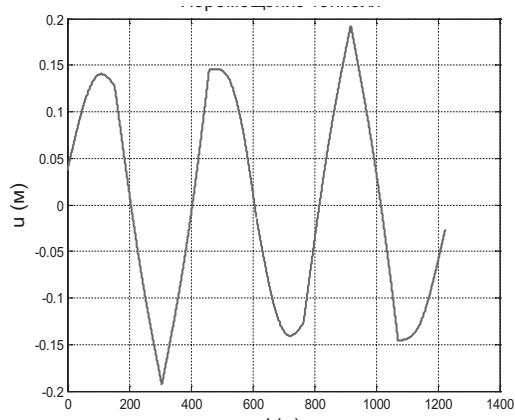


Рис. 11. Перемещение массива грунта и сечений тоннеля при распространении поперечной волны вдоль оси тоннеля.

начальное сжатие и касательную, ему соответствующую (рис. 10).

В таком варианте $K_0 = 24,4e3$ кН/м. Изгибная жесткость соединения между секциями с резиновой прокладкой находится по формуле:

$$K_\phi = H^2 K_0 \left(\frac{H}{3} + B \right) =$$

$$8,7^2 \times 24,44 \times 10^6 \times \left(\frac{8,7}{3} + 34,5 \right) = 6,9 \times 10^{10} \text{ Н/м.}$$

Коэффициент постели основания в соответствии с [12]:

$$K = \frac{16\pi\mu_m(1-\nu)H}{3-4\nu\lambda} =$$

$$\frac{16 \times 3,14 \times 0,063 \times 10^9 (1-0,35)}{(3-4 \times 0,35)} \frac{8,7}{406,8} =$$

$$2,75 \times 10^7 \text{ Н/м}^2,$$

где $\lambda = TC_s = 2 \times 203,4 = 406,8$ м – длина доминирующей волны.

Результаты расчёта представлены в графической форме на рис. 11, 12, 13.

Представленный метод расчёта позволяет на предварительном этапе проектирования получить внутренние усилия, запроектировать арматуру, оценить возможные осадки и смещения тоннельной обделки.

ОБДЕЛКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

При землетрясениях подземные сооружения с сечениями прямоугольной формы, находящиеся в мягких или скальных породах, будут испытывать поперечные деформации, по форме похожие на деформации стеллажей, из-за сдвигов породы.

Принимая во внимание, что основным эффектом при сейсмических воздействиях на тоннели являются деформации грунта, наиболее удобным способом расчёта следует считать метод перемещений.

Для оценки взаимодействия тоннельной обделки с грунтом используется упрощенный метод [12], который включает ряд операций.



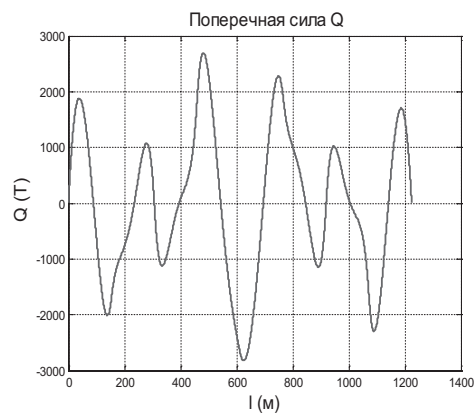
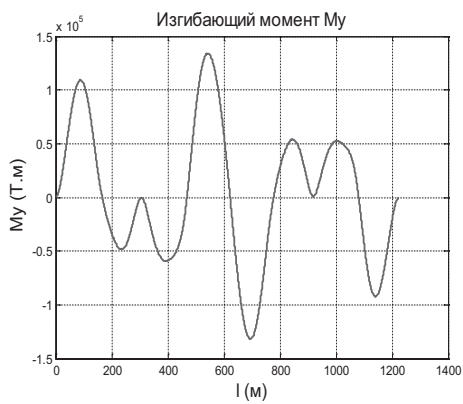


Рис. 12. Усилия в тоннельной обделке.

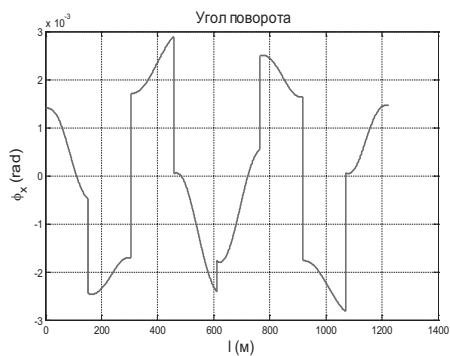


Рис. 13. Углы поворота сечений тоннельной обделки.

1. Фиксируются деформации сдвига «свободного поля» грунта γ_{max} и $\Delta_{free-field}$ — разность относительных перемещений верха и основания поперечного сечения тоннеля:

$$\lambda_{max} = \frac{V_{пик}}{C_{эф}} = \frac{0,55 \times 0,8}{203,4} = 0,00216; \quad (5)$$

$$\Delta_{free-field} = \gamma_{max} \times H = 8,7 \times 0,00216 = 0,0188 \text{ м.}$$

2. Определяется жёсткость при сдвиге коробчатой обделки с использованием метода расчёта рамных конструкций. Жёсткость на сдвиг можно найти, приложив единичную силу к верхнему перекрытию, полагая, что основание является неподвижным, но с допускаемыми вращениями в шарнирах. Отношение приложенной

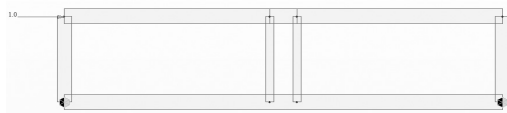


Рис. 14. Расчетная схема.

Таблица 2
Максимальные усилия в тоннельной обделке

$\gamma_{max a} (Rad)$	$M_{max} (КНм)$	$Q_{max} (КН)$
0,003	1,339e6	2818

силы к результирующему перемещению помогает уточнить коэффициент K_s (расчетная схема показана на рис. 14).

$$K_s = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{7,977e-6} = 125360,4 \text{ кН/м}^2.$$

3. Находится коэффициент изгибной жёсткости коробчатой конструкции по формуле:

$$F_r = \frac{G_m}{K_s} \frac{B}{H} = \frac{0,2567 \times 10^9 \times 34,5}{0,1254 \times 10^9 \times 8,7} = 8,117,$$

где H — высота поперечного сечения обделки;

G_m — средний модуль деформации сдвига грунта (на уровне основания и уровне перекрытия тоннеля), соответствующий величине напряжений;

K_s — жёсткость на сдвиг коробчатой конструкции обделки.

4. Определяется коэффициент сдвиговой жёсткости R_r для рассматриваемой конструкции. Коэффициент R_r — отношение сдвиговой деформации конструкции Δ_s , расположенной в грунте, к деформации свободного поля над конструкцией $\Delta_{free-field}$

$$R_r = \frac{\Delta_s}{\Delta_{free-field}} \quad (6)$$

Используя результаты исследований, представленных в работах [12,13], коэффи-

Таблица 3

Значения усилий в сечении тоннельной обделки

Условия расчета	N_{max} (КН)	M_{max} (КНм)	Q_{max} (КН)
Полное проскальзывание	2898	5328	1439
Без проскальзывания	2889	5313	1435

коэффициент сдвиговой жёсткости можно определить по формулам:

— при взаимодействии без проскальзывания тоннельной обделки относительно грунта:

$$R_r = \frac{4(1-\nu_m)F_r}{3-4\nu_m+F_r} = \frac{4(1-0,48) \times 8,117}{3-4 \times 0,48+8,117} = 1,8357; \quad (7)$$

— при взаимодействии с полным проскальзыванием тоннельной обделки относительно грунта:

$$R_r = \frac{4(1-\nu_m)F_r}{2,5-3\nu_m+F_r} = \frac{4(1-0,48) \times 8,117}{2,5-3 \times 0,48+8,117} = 1,84. \quad (8)$$

Используя формулы (5)-(8), получим деформации сдвига конструкции:

— при взаимодействии без проскальзывания:

$$\Delta_s = R_r \times \Delta_{free-field} = 1,835 \times 0,0188 = 0,0345 \text{ м};$$

— при взаимодействии с полным проскальзыванием:

$$\Delta_s = R_r \times \Delta_{free-field} = 1,84 \times 0,0188 = 0,0346 \text{ м}.$$

Беря во внимание полученные результаты, с помощью программного комплекса MIDAS CIVIL определяем внутренние усилия в сечении тоннельной обделки (таблица 3).

Выводы

Анализ построенных и проектируемых транспортных переходов, в которых используются тоннели из опускных секций, показывает, что при выборе варианта пересечения транспортными магистралями проливов, как показано на примере Керченского пролива, именно тоннель из опускных секций может быть наиболее экономичным, надежным и приемлемым с точки зрения затрат, времени строительства и рациональности применяемых технологий.

Тоннели в меньшей мере подвержены сейсмическим воздействиям, поскольку в них в отличие от наземных сооружений не возникает резонансных явлений. При прохождении сейсмических волн они деформируются, как окружающий их массив грунта, если он твердый, или значительно меньше, если грунт слабый. Эти деформации обычно малы и не представ-

ляют серьезной опасности для тоннельных обделок. Тем не менее при сильных землетрясениях тоннели могут получить повреждения.

Предложена методика расчёта конструкций тоннелей из опускных секций с учетом сейсмических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.ita-aite.org/en/publications/wg-publications/download/122_47ee7751b3b4b5472729a00b61295572. Доступ 26.09.2014.
2. <http://www.cei-demeyer.be/en/index.php?menu=229&cei-demeyer=type&type=2253&subtype=22531#liefkenshoecktunnel.pdf>. Доступ 26.09.2014.
3. Kiyomiya, O. Earthquake-resistant Design Features of Immersed Tunnels in Japan, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 463–475, 1995.
4. <https://archive.org/stream/earthquakeengine00owen#page/n0/mode/2up>. Доступ 26.09.2014.
5. Kiyomiya, O. Flexible joints between elements for large deformation. In (Re) Claiming the Underground Space», Vol. 1, pp. 329–334. Published by A.A. Balkema. Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress in Amsterdam, The Netherlands, www.balkema.nl and www.szp.swets.nl. Доступ 26.09.2014.
6. Курбацкий Е. Н. Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций/ Дис... док. техн. наук. — М., 1995. — 205 с.
7. Геология шельфа УССР Керченский пролив/ Шнюков Е. Ф., Аленкин В. М., Путь А. Л. и др. — Киев: Наукова думка, 1981. — 160 с.
8. Projekter.aau.dk/projekter/files/14460088/Thesis.pdf. Доступ 26.09.2014.
9. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ (РБ-006–98). Нормативный документ. — М.: НТЦ ЯРБ, 2000. — 76 с.
10. Kyriazis Pitilakis, Kyriazis; Argyroudis, Sotiris; Tsinidis, Grigoris. Seismic Design and Risk Assessment of Underground Long Structures. MONICO Workshop Structural Monitoring and Assessment of Underground Transportation Facilities, March 18, 2011, Athens, Greece. <http://www.monico-eu.org/documents/Workshop/1.%20Pitilakis%20-%20Seismic%20Design%20and%20Risk%20Assessment%20of%20Underground%20Long%20Structures.pdf>. Доступ 26.09.2014.
11. St John, C.M., Zahrah, T.F. A seismic Design of Underground Structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.2. No. 2, pp. 165–197, 1987.
12. <https://www.pbworld.com/pdfs/publications/.../wang.pdf>. Доступ 26.09.2014.
13. [http://www.readcube.com/articles/10.1002%2F\(SICI\)1096-9845\(200005\)29%3A5%3C683%3A3A%2F\(EQE932%3E3.0.CO%3B2-1](http://www.readcube.com/articles/10.1002%2F(SICI)1096-9845(200005)29%3A5%3C683%3A3A%2F(EQE932%3E3.0.CO%3B2-1). Доступ 26.09.2014. ●

