

Л. Л. КАУФМАН (Нью-Йорк, США), Б. А. ЛЫСИКОВ, К. Н. ЛАБИНСКИЙ,  
И. А. КОМЫШАН (ДонНТУ)

## ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА ТУННЕЛЕЙ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНАХ

Приведений огляд закордонного досвіду спорудження тунелів в сейсмонебезпечних районах, технічні рішення для запобігання наслідків землетрусів та приклади будівництва та реконструкції тунелів у сейсмічних зонах.

Представлен обзор зарубежного опыта сооружения туннелей в сейсмоопасных районах, технические решения по предотвращению последствий землетрясений и примеры строительства и реконструкции туннелей в сейсмических зонах.

The review of foreign experience of the tunnel construction in earthquake regions is shown in this paper. The technical solutions for prevention of the earthquake consequences and the examples of building and reconstruction of the tunnels in earthquake regions are listed below.

Основными мероприятиями по предотвращению повреждений подземных структур при землетрясениях являются:

- выбор направления туннеля, которое позволяет избежать пересечения зон активной тектонической деятельности. При невозможности такого решения проект должен учитывать смещения грунтов. Если туннельная структура должна функционировать после землетрясения,

в ней должны быть предусмотрены его возможные последствия;

- увеличение сечений туннелей в сейсмических зонах для: а) размещения дополнительного амортизирующего слоя крепи из дробленной породы; б) компенсации смещения участков туннеля относительно друг друга, горизонтальных и вертикальных искривлений туннеля (рис. 1);

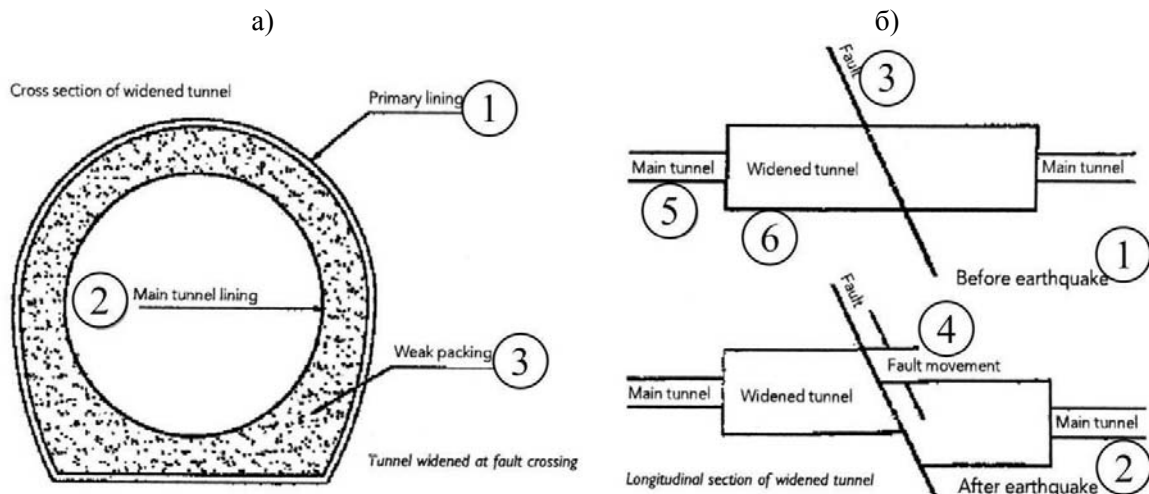


Рис. 1. Расширение туннеля при пересечении нарушения

а) поперечное сечение; 1 – первичная крепь, устанавливаемая вслед за экскавацией туннеля; 2 – основная туннельная крепь; 3 – амортизирующий слой крепи; б) продольный разрез; 1 – до землетрясения; 2 – после землетрясения; 3 – нарушение; 4 – перемещение нарушения; 5 – основное сечение туннеля; 6 – расширенное сечение туннеля

- усиленное крепление туннеля на опасных участках, выполняемое металлическими рамами, набрызг-бетоном по металлической сетке, анкерными болтами;

- увеличение толщины крепи действующих туннелей дополнительным слоем монолитного железобетона;

- заполнение пустот, образовавшихся за крепью туннеля, тампонажными растворами;

- усиление колонн и стыков конструкций станций метро стальными кожухами;

- стабилизация пород, окружающих туннель, путем их дренажа, нагнетания цементных и химических растворов;

– предотвращение всплытия погружного туннеля, проложенного в придонной траншее, его изоляцией от грунтов, разжиженных при сейсмическом воздействии. Такая изоляция достигается установкой ограждающих стен из шпунтовых свай, колонн каменных или создаваемых струйной цементацией.

Как показал опыт происшедших землетрясений, наиболее чувствительны к ним:

– соединения секций двух различных структур. Деформации здесь возникают за счет разницы вибрационных характеристик и концентрируются в стыках туннельных секций между собой или со стволами доступа и вентиляции, порталами и станциями;

– границы между слоями горных пород с различными свойствами, например, крепких и слабых пород или насыпных грунтов и скальных (коренных) пород.

Предотвращение уязвимости стыков подземных структур может быть достигнуто использованием гибких соединений сегментов крепи между собой или с примыкающими сооружениями (рис. 2). Если жесткость стыков

уменьшается, ими абсорбируются деформации пород, а силы, сдвигающие структуру, уменьшаются.

В местах соединения элементов железобетонной конструкции туннельной секции устанавливаются податливые узлы со срезаемыми бетонными шпонками (shear key), обеспечивая в необходимых случаях податливость соединения. При нормальном режиме работы такой узел податливости передает расчетные поперечные усилия. При этом его несущая способность, обычно не превышающая 75 % от максимальной несущей способности конструкций туннеля, обеспечивает их устойчивость. Однако, при землетрясении, когда нагрузки превышают возможности узла податливости, он разрушается, компенсируя возникшие деформации окружающих пород, но сохраняя тем самым основные элементы структуры.

Предотвращение уязвимости границы между слоями горных пород обеспечивается созданием изолирующих слоев вокруг подземных структур на стыках пород с разными геологическими свойствами (рис. 3).

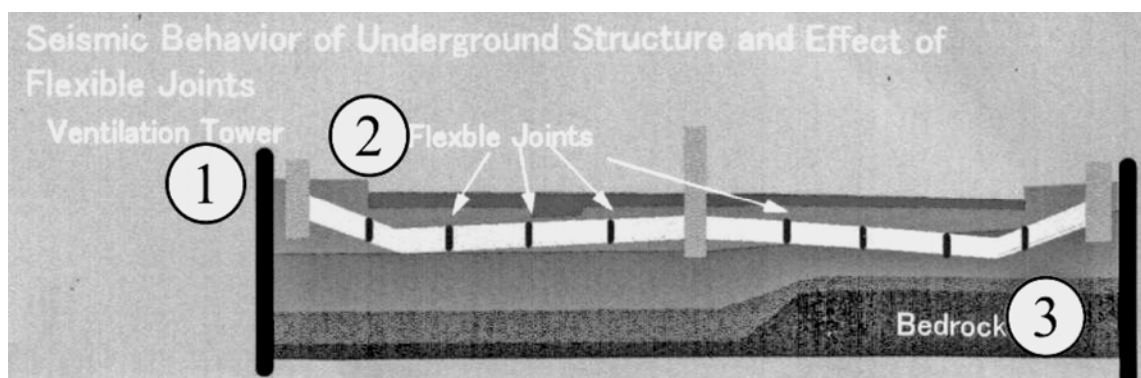


Рис. 2. Сейсмическое поведение подземной структуры и эффект от гибких стыков  
1 – вентиляционная башня; 2 – гибкие стыки; 3 – порода

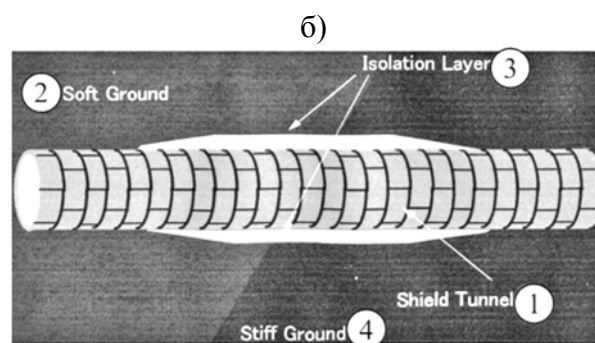
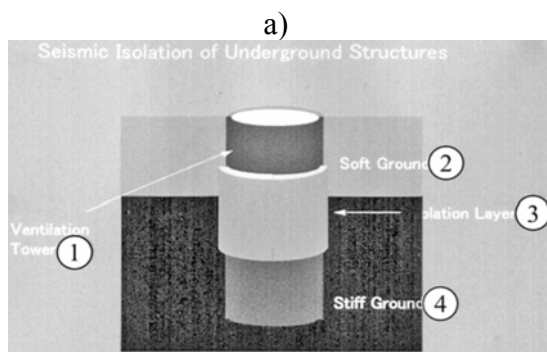


Рис. 3. Сейсмическая изоляция подземных структур

а) изоляция вентиляционной башни туннеля; б) изоляция туннеля

1 – вентиляционная башня; 2 – слабая порода (наносы); 3 – изоляционный слой; 4 – крепкие (коренные) породы

Изолирующие слои изготавливаются из материалов, противостоящих усилиям сдвига; имеющих долговечность, долгосрочную стабильность и малые объемные изменения; приемлемых для применения в строительстве по технологическим условиям; водонепроницаемых; нерастворимых в подземных водах; незагрязненных.

При проходке туннелей щитовыми машинами используются материалы, основанные на асфальте, силиконе или полиуретане, при открытом способе строительства – сборные резиновые панели. Изолирующие слои, предотвращающие последствия землетрясения, могут применяться не только в туннельных структурах, но и других подземных или заглубленных объектах, например, в подземных автостоянках.

Примером строительства и реконструкции туннелей в сейсмических зонах является туннель Клеймонт (Claremont), Калифорния, США, построенный в 1926-29 гг. Он имеет длину 5.5 км, арочное сечение шириной 2.74 м и предназначен для самотечной транспортировки

воды, поступающей к центру Клеймонт в районе залива Ист Бэй (East Bay), Сан-Франциско от очистных сооружений Оринда (Orinda). Объем воды, поступающей по туннелю, составляет 416...662 тыс. м<sup>3</sup> в сутки.

Трасса туннеля почти перпендикулярно пересекает активное тектоническое нарушение Хейвард Фолт (Hayward Fault) (рис. 4). На участке пересечения выделены две зоны: первичная – зона непосредственного перехода туннелем нарушенных пород длиной 18 м и вторичная – зона общей длиной 280 м, примыкающая к первичной с обеих сторон.

С вероятностью 17% ожидается, что до 2030 г. в этой сейсмической зоне возможно землетрясение силой 6.7 баллов и более по шкале Рихтера. Максимальное ожидаемое смещение пород составит 2.3 м в первичной зоне, что выведет из строя существующий туннель, и 0.7 м – во вторичной зоне. Кроме того, нарушение Хейвард Фолт испытывает медленное относительное перемещение, равное 6 мм в год или 0.3 м за 50 лет.

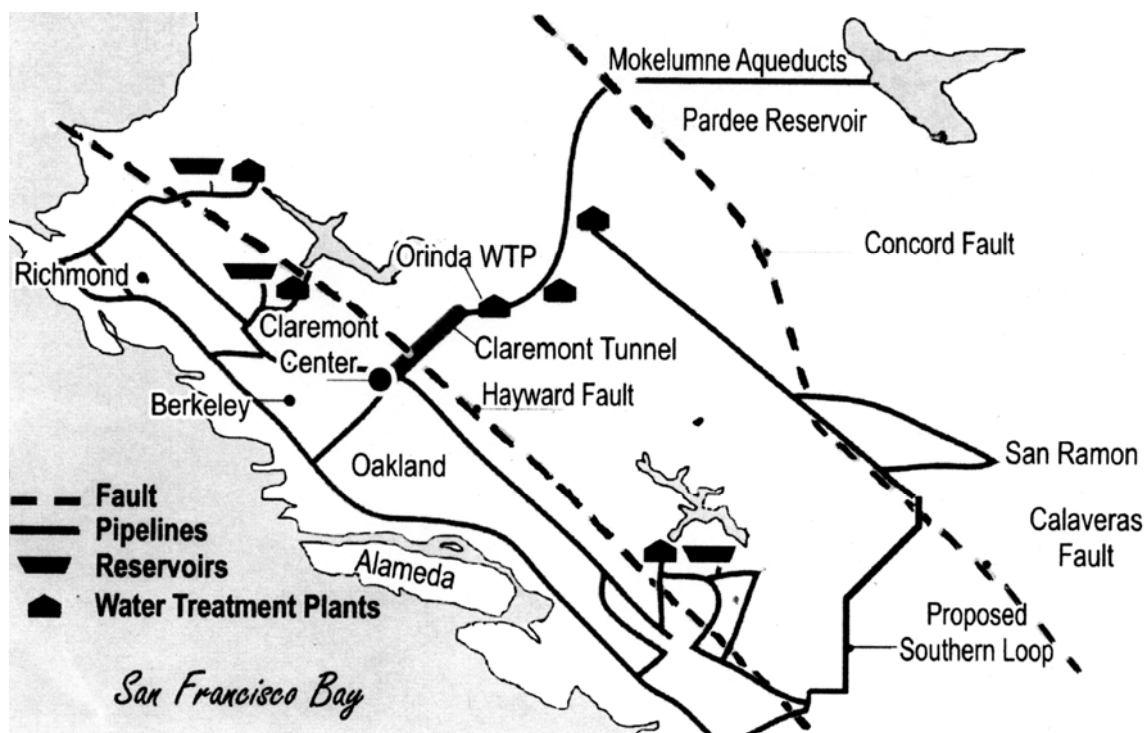


Рис. 4. Карта расположения туннеля Клеймонт и тектонических нарушений

Проектные проработки показали невозможность реконструкции туннеля, как по строительным соображениям, так и из-за необходимости непрерывного снабжения водой района, обслуживаемого туннелем. В связи с этим принято решение о проходке в нарушенной зоне параллельно существовавшему обходному туннелю длиной 457 м с туннелем доступа

длиной 229 м. Увеличенное сечение обходного туннеля рассчитано так, чтобы при его перекрытии сейсмическим смещением пород сохранить часть пространства для размещения водопроводной трубы с внутренним диаметром 1.8 м, необходимым по условиям водоснабжения, и толщиной стенок 76 мм. На рис. 5 показано положение туннеля до землетрясения и

после него, когда из-за смещения окружающих пород и сечения туннеля водопроводная труба изменяет положение, благодаря направляющим фланцам на каждом ее конце.

В качестве временной крепи обходного туннеля приняты металлические арки и анкерная крепь. Затем арки бетонируются, толщина постоянной крепи туннеля составляет 0.7 м. На участке туннеля, пересекающем первичную сейсмическую зону, ширина сечения принята равной 5.2 м. Для минимизации опасности разрыва туннеля рядом с основным проводятся два боковых туннеля. Вслед за экскавацией пород эти туннели крепятся фибергласовыми анкерами и набрызг-бетоном по металлической сетке. Основной туннель сооружается стадиями – вначале проходится опережающий (пилотный) туннель, затем производят его расширение до полного проектного сечения.

Бетонирование боковых туннелей обеспечивает необходимую прочность главного (обходного) туннеля при сейсмических сдвигениях горных пород. Фибергласовые анкера, установленные в боковых туннелях, увеличивают устойчивость пород, пересекаемых главным туннелем (рис. 6).

Строительство обходного туннеля началось в 2004 г.

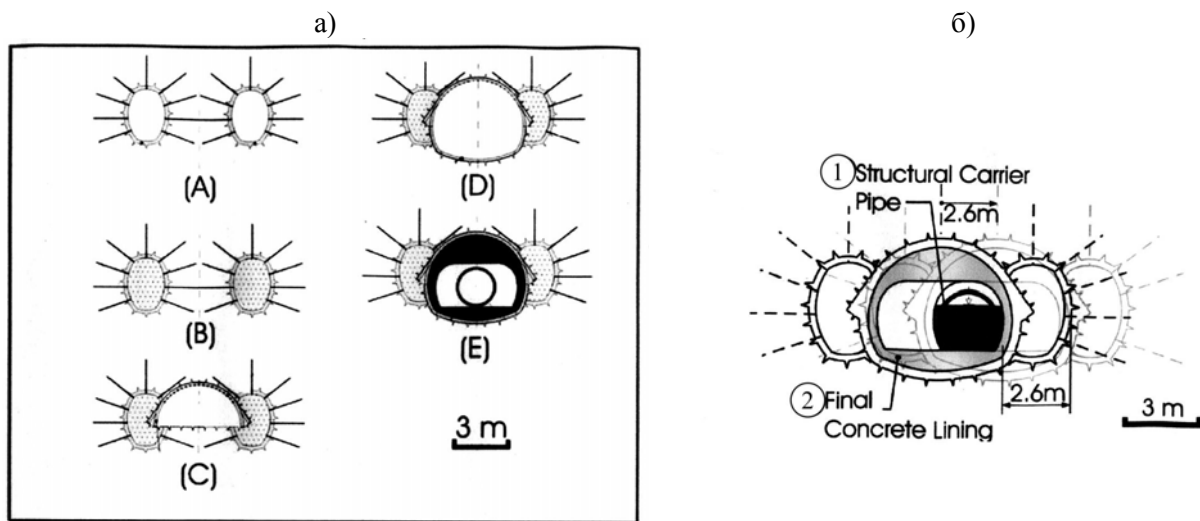


Рис. 6. Строительство боковых туннелей

а) стадии строительства; А – экскавация и крепление боковых туннелей; В – заполнение боковых туннелей бетоном; С – экскавация и крепление опережающего (пилотного) туннеля; D – расширение пилотного туннеля до проектного сечения; E – окончательная бетонная крепь туннеля и установка водопроводной трубы ; б) смещение обходного туннеля при землетрясении (1 – водопроводная труба; 2 – окончательная бетонная крепь)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caulfield R. Seismic Design Measures for the Retrofit of the Claremont Tunnel. [http://www.jacobssf.com/art\\_caulfield\\_claremont\\_05.htm](http://www.jacobssf.com/art_caulfield_claremont_05.htm).

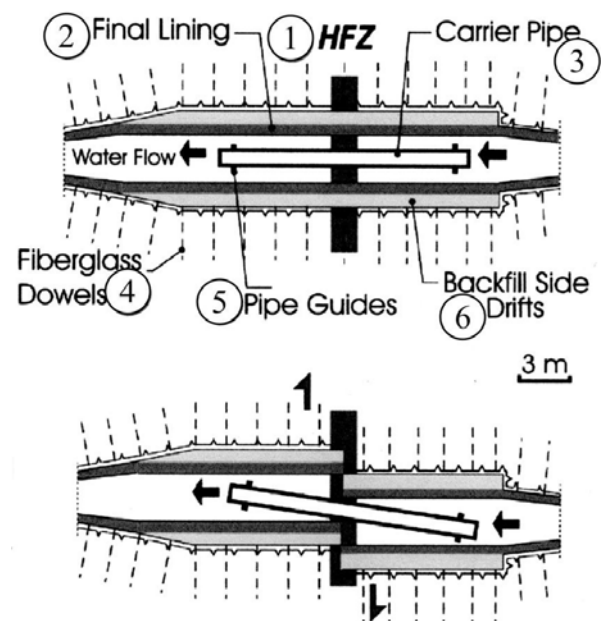


Рис. 5. Смещение трубопровода при землетрясении (узкая первичная сейсмическая зона)

а) положение трубопровода до землетрясения; 1 – первичная сейсмическая зона; 2 – окончательная крепь; 3 – водопроводная труба; 4 – фибергласовые анкера; 5 – направляющие фланцы; 6 – боковые туннели; б) положение трубопровода после землетрясения

2. Claremont. Project Description. [http://www.ebmud.com/water\\_8\\_environment/water\\_supply/current\\_projects/claremont-corridor/chapter\\_2.pdf](http://www.ebmud.com/water_8_environment/water_supply/current_projects/claremont-corridor/chapter_2.pdf).

Поступила в редколлегию 22.10.2007.