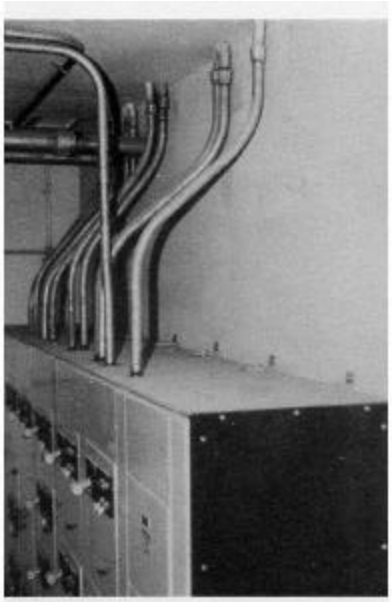
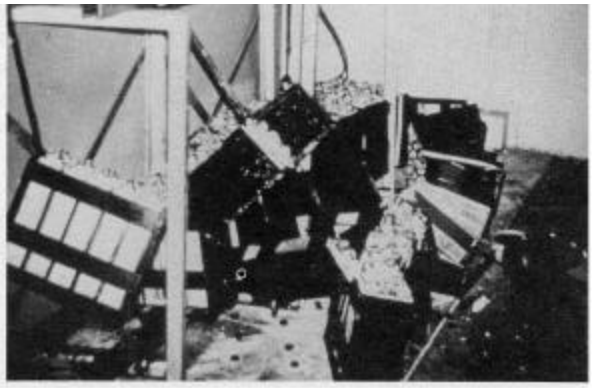


Fuente: D.B. Ballantyne.
Figura 3-38 Panel instalado con abrazaderas angulares que lo fijan a la pared.

Fuente: D.B. Ballantyne.
Figura 3-39 Motor de bomba grande que se quemó debido a la oscilación de voltaje en estación de impulsión en Baguio Filipinas.



Fuente: Federal Emergency Management Agency.
Figura 3-40 Baterías no ancladas que se desplomaron.

Edificaciones y estructuras

El UBC se centra en mantener el edificio erguido por razones de seguridad humana después de un terremoto severo o de diseño, independientemente de la función del edificio. La función del edificio puede ser importante en la implementación de los planes de operación y respuesta frente a emergencias del sistema de agua luego de un evento sísmico. Los edificios que albergan el equipo requerido para hacer frente a una emergencia y los materiales de reparación deberán ser accesibles. Evalúe los edificios teniendo en mente su función y operación después de un sismo. Los edificios que muestren señales de peligro luego de un sismo pueden ser declarados ruinosos y se puede prohibir su ingreso.

Las estaciones de bombeo son estructuras simétricas pequeñas que usan un diseño de muros de corte y que generalmente soportan bien los eventos sísmicos. Asegúrese de que las paredes hayan sido firmemente ancladas al piso y que el techo esté fijamente anclado a las paredes. Los edificios de plantas de tratamiento más grandes usan una variedad de diseños, algunos de los cuales son vulnerables.

Las edificaciones de mampostería no reforzada (MNR) son las más vulnerables (ver figura 3-41). Los parapetos en edificaciones de mampostería no reforzada son particularmente vulnerables y deben ser arriostrados o removidos.

Las edificaciones no dúctiles de pórticos de concreto y las edificaciones con paneles muy esbeltos no han soportado bien los terremotos históricos (ver figura 3-42). Las

edificaciones con paneles esbeltos construidas antes de mediados de los setenta son particularmente vulnerables; la unión techo-pared se ha desplomado en sismos recientes.

Las construcciones de tipo Butler (nave industrial) con pórticos de acero arriostrados (figura 3-43) son sismorresistentes. Sin embargo, las edificaciones algunas veces son modificadas, lo cual debilita su resistencia sísmica. No retire los elementos de arriostramiento (ver figura 3-44); reemplace aquellos que hayan sido removidos.

Para una evaluación de las edificaciones existentes, consulte el documento *Rapid Visual Screening of Buildings for Potencial Seismic Hazards: A Handbook* (FEMA, 1988).

Las estaciones de bombeo y las plantas de tratamiento de agua deben ser diseñadas de acuerdo a las disposiciones sísmicas especificadas por los códigos locales o nacionales de construcción. Como mínimo, el diseño del edificio debe cumplir con los requisitos sísmicos del código local o nacional de construcción.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration.

Figura 3-41 Edificación de mampostería no reforzada que colapsó parcialmente.

Fuente: William Gates.

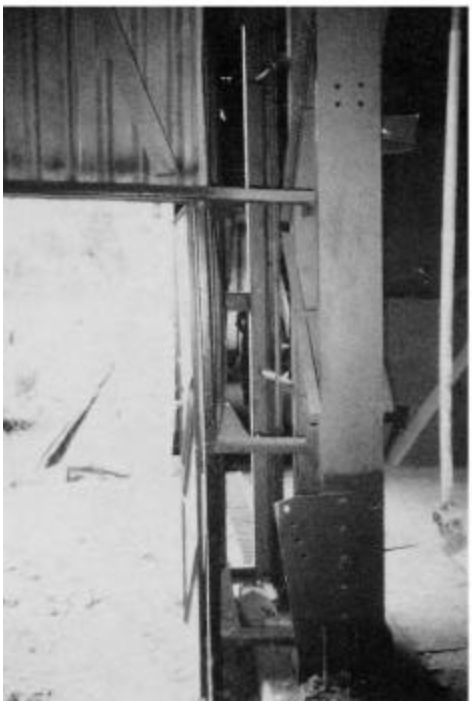
Figura 3-42 Ruptura en la columna no dúctil de concreto en San Fernando, California.

Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-43 Las edificaciones de pórticos arriostrados de acero son sismorresistentes.

Flexibilidad y redundancia en la operación

El diseño sísmico debe incluir las medidas necesarias para eventualmente prescindir (*by-pass*) del tratamiento en la planta y brindar cloración de emergencia en caso que sismos dañen las estructuras de tratamiento.



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 3-44 Edificio de pórticos arriostrados de acero en Moin, Costa Rica, donde un arriostre fue removido. El sismo dejó el edificio permanentemente torcido.

Tuberías

Introducción

Históricamente, el daño a las tuberías durante los sismos a menudo ha afectado todo el sistema de abastecimiento de agua. Las roturas de tuberías causan la pérdida rápida de agua y producen el vaciado del reservorio. Cuando el servicio público de energía está fuera de servicio, los reservorios no se pueden volver a llenar y el sistema puede quedarse sin agua por varios días.

Las tasas de falla de las tuberías (en reparaciones por unidad de longitud) son más altas en áreas con fallas del terreno o licuefacción. El mapeo de amenazas se ha convertido en una herramienta importante para mitigar los efectos de los sismos sobre las tuberías (figura 3-45).

Por lo general, las tuberías de conducción y distribución del sistema de agua están enterradas a 2,5 a 6 pies (0,75 a 1,8 m) de profundidad o más en regiones frías. Las tuberías de conducción algunas veces se colocan en forma elevada sobre pilotes de apoyo.

En el cuadro 3-1 se incluyen los materiales de las tuberías y los tipos de uniones para la mayoría de tuberías actualmente utilizadas, así como sus respectivas normas AWWA. El cuadro también muestra las categorías de vulnerabilidad sísmica (refiérase a la sección sobre deformación permanente

del suelo más adelante en este capítulo). El hierro fundido, el acero remachado y el acero soldado con gas no tienen designaciones de AWWA porque han dejado de fabricarse. Sin embargo, existe un amplio número de instalaciones inventariadas.

Cuadro 3-1 Materiales de tuberías de agua comúnmente usados, normas aplicables y su vulnerabilidad frente a la deformación del suelo.

Tipo de material y diámetro	Norma AWWA	Tipo de unión
Vulnerabilidad baja		
Hierro dúctil	Series C1xx*	Campana y espiga con empaque de caucho, fija
Polietileno	C906	Fundida
Acero	Series C2xx	Soldada con arco voltaico
Acero	Sin designación	Remachada
Acero	Series C2xx	Campana y espiga con empaque de caucho, fija
Vulnerabilidad baja a media		
Cilindro de concreto	C300, C3003	Campana y espiga, fija
Hierro dúctil	Series C1xx*	Campana y espiga con empaque de caucho, suelta
Policloruro de vinilo	C900, C905	Campana y espiga, fija
Vulnerabilidad media		
Asbesto-cemento > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Series C4xx*	Acoplada
Hierro fundido > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Sin designación	Campana y espiga con empaque de caucho
Policloruro de vinilo	C900, C905	Campana y espiga, suelta
Acero	Series C2xx	Campana y espiga con empaque de caucho, suelta
Vulnerabilidad media a alta		
Asbesto-cemento 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Series C4xx	Acoplada
Hierro fundido 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Sin designación	Campana y espiga con empaque de caucho
Cilindro de concreto	C300, C303	Campana y espiga, suelta
Acero	Sin designación	Soldada con gas
Vulnerabilidad alta		
Hierro fundido	Sin designación	Campana y espiga, galvanizada o de mortero

* Se refiere a las series de las normas AWWA indicadas por la letra y el primer dígito de su número de tres dígitos. C1xx se refiere a las series C100s (tubería de hierro dúctil y accesorios), C2xx se refiere a las series C200s (tubería de acero) y C4xx se refiere a las series C400s (tubería de asbesto-cemento).

Las tuberías pueden incluir accesorios como válvulas de compuerta, de mariposa o de descarga de aire/vacío; hidrantes; y tubos de expulsión. Las válvulas de compuerta o de mariposa se usan para aislar segmentos de tuberías. Las válvulas de descarga de aire/vacío se usan para descargar el aire atrapado y ventilar las tuberías a fin de prevenir la formación de vacíos. Los hidrantes se usan para obtener agua para la extinción de incendios. Los tubos de expulsión se ubican en puntos bajos para permitir la remoción de sedimentos y poder vaciar la tubería.

Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-45 Las áreas trazadas como susceptibles a la licuefacción (áreas sombreadas a lo largo del río) sufrieron la mayor parte del daño a sus tuberías en Santa Cruz, California, durante el terremoto de Loma Prieta.

Mecanismos de falla

Los mecanismos de falla que afectan a las tuberías pueden incluir la propagación de ondas, la deformación permanente del suelo (DPS) y la ruptura de fallas.

Las tasas de falla de las tuberías en áreas donde no se produce licuefacción pero sí se producen fallas del terreno (IMM de VIII o menos) (es decir, pequeños deslizamientos, grietas y terreno húmedo) equivalen aproximadamente a ocho veces las fallas debido a la propagación de ondas. Las tasas de falla de las tuberías en áreas donde sí ocurre la licuefacción son de aproximadamente 12 veces las tasas de falla por propagación de ondas.

El daño a los hidrantes es un caso especial. Los hidrantes o grifos de incendio han resultado afectados por el colapso de edificaciones, lo cual ha causado el vaciado del reservorio y un caudal no controlado. Se debe considerar el uso de hidrantes a ras del suelo, como aquellos usados en Tokio y Londres (ver figura 3-46).

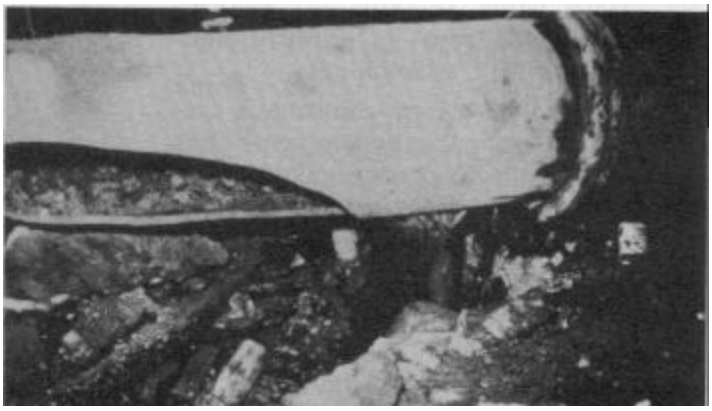
Propagación de ondas. Las tuberías se rompen debido al paso de la onda sísmica como resultado del movimiento diferencial a lo largo del eje longitudinal de la tubería (ver figura 3-47). La tracción y compresión producen el movimiento diferencial primario. Como se mencionó, la tasa de falla (reparación por unidad de longitud) es pequeña comparada con otros mecanismos de falla. La flexión o rotación de las uniones es insignificante. La propuesta presentada en *Pressure Pipeline Design for Water and Wastewater* (ASCE, 1992) se puede usar para estimar el movimiento diferencial entre las secciones contiguas de una tubería para una "unión típica". Sin embargo, el daño generalmente no ocurre en una unión típica. La velocidad apropiada de propagación de la onda debe ser proporcionada por un ingeniero geotécnico que esté trabajando en grupo con un sismólogo.

En casi todos los casos, la tubería de acero soldado por arco voltaico o la tubería de polietileno son lo suficientemente dúctiles para soportar las deformaciones del terreno debido a la propagación de ondas sin causar daño alguno.

La corrosión también puede romper las tuberías debido a la propagación de ondas o a la deformación permanente del suelo (figura 3-48). Se deben evaluar las tuberías que tienen un historial de mantenimiento excesivo debido a fugas causadas por la corrosión. Proporcione tuberías con un revestimiento o una protección catódica apropiada para el control de la corrosión.

Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-46 La señal en el poste marca la ubicación de los hidrantes a ras del suelo en Tokio, Japón.



Fuente: Seattle Water Department.

Figura 3-47 Tubería de 20 pulgadas (510 mm) de diámetro que colapsó en el centro de Seattle luego del terremoto de 1965.

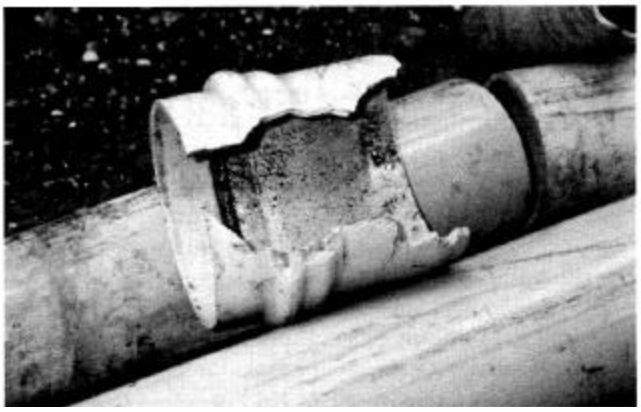
Fuente: Duane Ford .

Figura 3-48 Tubería corroída que colapsó en el terremoto de Coalinga, California.

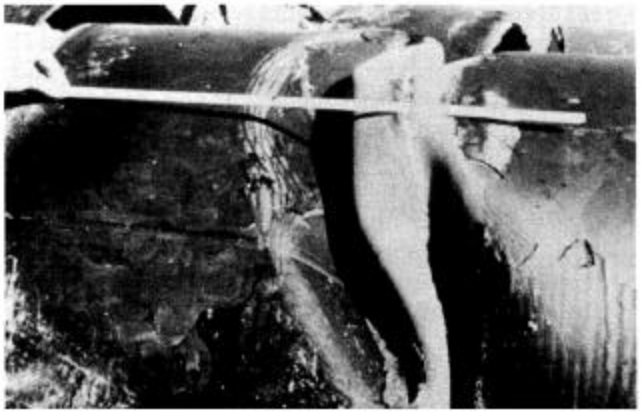
Deformación permanente del suelo. Las tuberías se mueven con el suelo durante la licuefacción o el flujo lateral (figuras 3-49 y 3-50), el asentamiento diferencial, el agrietamiento y el deslizamiento. Las tuberías fallan porque se doblan, se someten a esfuerzos de corte, a tracción y a compresión (figura 3-51). Este mecanismo de daño incrementa las tasas de falla en comparación con la propagación de ondas. Las tuberías parcialmente vacías (principalmente alcantarillados de gravedad) pueden flotar debido a la licuefacción si la profundidad a la que se encuentra enterrado el alcantarillado lo coloca dentro de la capa licuada. Asimismo, las conexiones pueden romper la tubería y afectar los servicios.

Es importante elaborar mapas de las amenazas de la licuefacción y de otros tipos de deformación permanente del suelo para comprender la vulnerabilidad de la tubería dentro de un sistema de agua y para diseñar nuevas tuberías que podrían atravesar áreas con deformación permanente del suelo. Esta deformación provocada por la licuefacción se puede cuantificar usando el índice de intensidad de la licuefacción desarrollado por Youd y Perkins (1987), y más recientemente, el análisis de regresión lineal múltiple (RLM) desarrollado por Bartlett y Youd (1992). Se han elaborado mapas de deformación permanente del suelo para algunas áreas.

Fuente: D.B. Ballantyne.
Figura 3-49 El flujo lateral produjo el agrietamiento del terreno en Agoo, Filipinas



Fuente: D.B. Ballantyne.
Figura 3-50 Rotura por compresión en la unión de la tubería de PVC causada por el flujo lateral



Fuente: Los Angeles Department of Water and Power.
Figura 3-51 Tubería de acero que se rompió debido a la compresión en el terremoto de San Fernando.

La deformación permanente del suelo produce una combinación de desplazamiento longitudinal y transversal en relación con el eje axial de la tubería. Para uniones sueltas, como la de campana y espiga, el movimiento longitudinal es soportado principalmente por la extensión y comprensión axial en la unión. Dependiendo del tipo de unión,

específicamente la profundidad de la campana o la distancia del empalme y la ubicación de la espiga dentro de la campana, una unión simple en extensión axial puede resistir 1½ pulgadas (40 mm) de desplazamiento antes de que se produzcan fugas y la tubería se desprenda de la unión. Una unión simple en compresión, para uniones sueltas o fijas, puede resistir posiblemente ¾ de pulgada (20 mm) de desplazamiento antes de que se produzca contacto entre la espiga y la campana. Dependiendo de la resistencia y la ductilidad de la tubería, la espiga puede empujar la campana y la tubería longitudinalmente transfiriendo parte de la deformación unitaria por compresión, o partir la campana, haciendo que se rompa. Para uniones fijas, la deformación permanente del suelo longitudinal en tracción causa una deformación axial en el segmento de la tubería.

La deformación permanente del suelo transversal produce una combinación de flexión del segmento de la tubería, rotación de las uniones y extensión axial. La cantidad relativa de flexión y rotación de las uniones está en función de la proporción de longitud con relación a diámetro de la tubería (L/D), la rotación máxima permisible de las uniones y la resistencia y ductilidad de la tubería. Si la proporción de L/D es alta y la tubería tiene una baja ductilidad, como aquellas de hierro fundido y de asbesto-cemento, puede ser vulnerable a la rotura por flexión (ver figura 2-7). La tubería con una alta ductilidad, como la de hierro dúctil, polietileno y acero, se puede doblar. La rotación máxima permisible de las uniones se puede estimar basada en la recomendación del fabricante para el radio mínimo de instalación de tuberías. Generalmente, mientras más grande sea el diámetro de la tubería, mayor será el radio mínimo de instalación y menor será la rotación permisible de las uniones. Cuando se excede la rotación permisible de las uniones, algunos diseños de uniones sueltas de campana-espiga se romperán al separarse, y algunos transferirán un momento de flexión al segmento de la tubería. Algunos sistemas de uniones fijas permiten que las uniones roten después de haber sido instaladas.

La vulnerabilidad relativa de los materiales de las tuberías de agua a la deformación permanente del suelo se presenta en el cuadro 3-1. Sin embargo, para una tubería de material y un tipo de unión determinados, es difícil establecer qué cantidad de movimiento de la deformación permanente del suelo va a producir ruptura sin antes saber el tipo, modo y extensión espacial de los movimientos de la deformación permanente del suelo. Por ejemplo, una tubería de hierro fundido con una unión sellada con plomo tendría probabilidad de romperse debido a una desviación transversal abrupta de 4 pulgadas (102 mm) en el margen de la zona de flujo lateral. Sin embargo, la misma tubería probablemente soportaría una deformación permanente del suelo transversal sinusoidal distribuida de 4 pulgadas (102 mm) sobre un ancho de 160 pies (50 m). Es decir, para una deformación permanente del suelo transversal, las desviaciones abruptas son más peligrosas que las desviaciones distribuidas “en escalones”. De manera similar, para tuberías con uniones sueltas, la deformación permanente del suelo longitudinal abrupta tiene mayor posibilidad de producir una ruptura que la deformación permanente del suelo longitudinal distribuida. Para tuberías con uniones fijas o sueltas, la deformación permanente del suelo longitudinal distribuida tiene mayor probabilidad de producir rupturas que la deformación permanente del suelo transversal distribuida.

La dirección de la deformación permanente del suelo es casi siempre cuesta abajo o hacia una superficie libre, como el margen de un río o una zanja de drenaje. Actualmente, no se cuenta con información suficiente para estimar la configuración de la deformación permanente del suelo; es decir, desviaciones abruptas versus movimiento distribuido.