

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	El efecto de los sismos en los acueductos.
<i>Autor / Adscripción</i>	José Raúl Flores Berrones Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA Alonso Echavarría Luna Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industria, CNA
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, (2): 9-18
<i>Fecha de publicación</i>	1989
<i>Resumen</i>	Entre los efectos catastróficos que produjeron los sismos de 1985, tanto en la Ciudad de México como en otras ciudades cercanas al epicentro, estuvo la ruptura de las tuberías de las redes primarias y secundarias de agua potable. Este trabajo presenta una breve descripción de los mecanismos de falla, la metodología para lograr diseños resistentes a sismos, algunos de los métodos de análisis más empleados en Japón, así como algunos de los criterios y medidas de seguridad con que cuenta ese país y que pueden ser de utilidad para los acueductos construidos y por construirse en México.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1219

El efecto de los sismos en los acueductos

José Raúl Flores Berrones

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

Alonso Echavarría Luna

Subdirección General de Infraestructura
Hidráulica Urbana e Industrial, CNA

Entre los efectos catastróficos que produjeron los sismos de 1985, tanto en la Ciudad de México como en otras ciudades cercanas al epicentro, estuvo la ruptura de las tuberías de las redes primarias y secundarias de agua potable. Las causas que originaron el fallo de tuberías subterráneas, así como el tipo de fallamientos observados en ellas fueron diversos (Flores, 1986). En cualquier comunidad humana los abastecimientos de agua, gas y electricidad son líneas vitales y, en particular, el agua es indispensable. En el pasado, la destrucción de los acueductos por sismos fue muy severa y aun en países altamente desarrollados como Japón, se consideraba que este tipo de problemas era inevitable. Actualmente, se realizan estudios e investigaciones en todo el mundo con la finalidad de tomar medidas preventivas y operativas que permitan la resistencia de las tuberías ante la acción de los sismos. Este trabajo presenta una breve descripción de los mecanismos de falla, la metodología para lograr diseños resistentes a sismos, algunos de los métodos de análisis más empleados en Japón, así como algunos de los criterios y medidas de seguridad con que cuenta ese país y que pueden ser de utilidad para los acueductos construidos y por construirse en México.

Tuberías enterradas

Fuerzas sísmicas sobre tuberías

Los elementos estructurales enterrados, tales como las tuberías construidas en depósitos del subsuelo, se comportan como elementos flexibles con una tendencia a seguir los desplazamientos del suelo durante un sismo. Sin embargo, las tuberías son elementos estructurales con su propia rigidez, que ofrecen cierta resistencia a seguir los movimientos del suelo, de forma que generan fuerzas importantes de empuje y fricción. La rigidez estructural de las tuberías enterradas es un factor muy importante en el momento flexionante y durante el esfuerzo cortante inducido por el sismo, por lo que sería conveniente lograr un diseño en el cual la flexibilidad fuera compati-

ble con las deformaciones y esfuerzos esperados. Más aún, las juntas entre las diferentes secciones deben proyectarse lo suficientemente fuertes para transmitir las fuerzas cortantes que el suelo genera sobre las tuberías.

La configuración o amplitud máxima de los desplazamientos sísmicos puede calcularse si se conocen las características geológicas y los parámetros dinámicos de los estratos que integran la masa del subsuelo, además de la respuesta de aceleración del terreno de cimentación; esta última se puede estimar a partir de los espectros de respuesta de los sismos más severos registrados en las zonas más cercanas al sitio donde se localiza la tubería. El cálculo de las fuerzas de arrastre producidas por los desplazamientos del subsuelo, se realiza mediante los modelos de interacción tubería – suelo.

De acuerdo con las experiencias en Japón, el daño sísmico a tuberías enterradas ocurre cuando las aceleraciones son superiores a los 200-250 gal (1 gal = 1 m/s²), y consiste principalmente en dislocaciones, aplastamiento y agrietamientos.

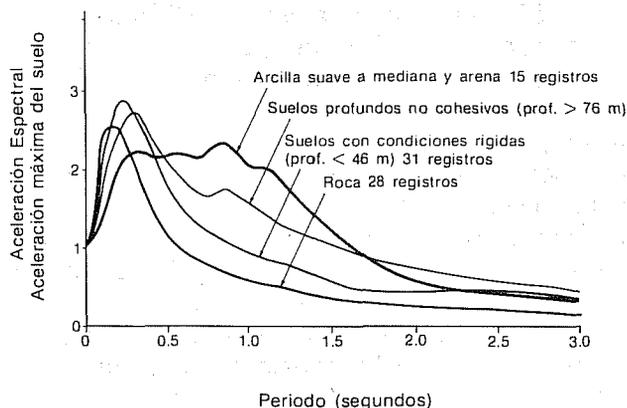
A fin de efectuar un análisis que permita prever el tipo de falla y su localización más probable, es necesario considerar el comportamiento del terreno cuando se encuentra sujeto a vibraciones sísmicas. Esto es, si se parte de la hipótesis de que la vibración de la roca basal será similar en dos sitios adyacentes, las diferencias locales en la geología y las propiedades mecánicas del suelo sobreyacente darán lugar a diferentes movimientos en la superficie del terreno en ambos sitios. Esto significa que la profundidad del suelo que se encuentra sobreyaciendo al lecho de roca basal afecta la respuesta dinámica (el periodo natural de vibración del terreno se incrementa al aumentar el espesor de los depósitos blandos). En la ilustración 1 se muestran los espectros de respuesta para sitios con distintas condiciones.

Por su parte, los cambios horizontales de tipo de suelo a lo largo de un sitio, afectan en forma local la respuesta dinámica de éste e influyen en la seguridad de las tuberías subterráneas.

La profundidad de desplante de las tuberías es otro de los factores que incide en la magnitud de los daños sísmicos; en general, cuando la profundidad de desplante es mayor, el daño tiende a ser menor. Esto no significa que la intensidad sísmica sea pequeña a poca profundidad bajo la superficie del terreno, sino que refleja un daño sísmico menor, asociado a

1. Espectro de aceleración promedio para sitios con distintas condiciones (Seed et al 2)

Número total de registros 104 Espectros para 5% de amortiguamiento



presiones de confinamiento mayores, a medida que se incrementa la profundidad de desplante de la tubería. Al respecto, durante el sismo de Kanto, Japón (septiembre 10. de 1923), en las tuberías para la distribución de agua al pueblo de Hatano, localizado cerca del epicentro, se encontró una relación de destrucción de 1 en 3 unidades de longitud en las zonas donde esta tubería estaba enterrada a 1.2 m, mientras que las que estaban a 2.40 m, no sufrieron daño alguno. En ambos casos no había diferencias en la topografía, geología o dirección de enterramiento. El distinto comportamiento se debió exclusivamente a la variación en la profundidad de desplante.

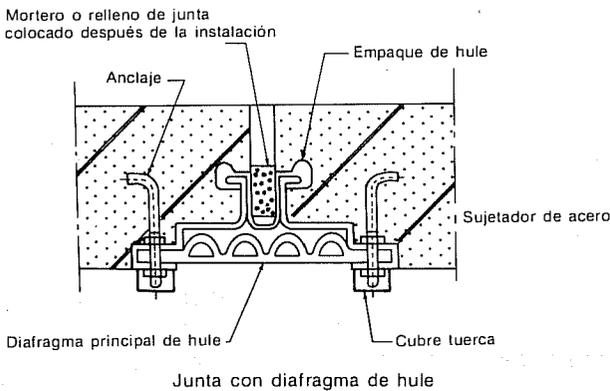
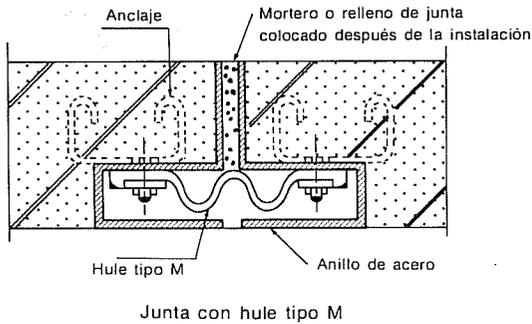
Por otra parte, la magnitud del daño sísmico se relaciona con la dirección en que se colocan las tuberías y la dirección principal de las ondas sísmicas en el terreno de cimentación. Una línea de conducción tenderá a flexionarse cuando se someta a ondas en dirección ortogonal a los tubos. Cuando las deflexiones del terreno son considerables, las juntas se deformarán y los tubos tenderán a romperse. Además, cuando las tuberías soportan movimientos sísmicos en la misma dirección de las líneas, éstas se jalarán y empujarán axialmente, con lo que tenderán a dislocarse o chocar entre tramos de tubería contiguos, provocando separaciones, grietas y aplastamientos en dichos tramos. Para contrarrestar estos efectos destructivos, es necesario instalar juntas tanto de expansión como flexibles; en las ilustraciones 2 y 3 se muestran algunos ejemplos de cómo se emplean estas juntas en Japón.

Para el caso particular de las tuberías de concreto reforzado de gran diámetro, además de permitir expansión y contracción axiales, así como giros, es conveniente reforzar las líneas en las zonas donde ocurren los máximos esfuerzos –por ejemplo, en las uniones entre tubos y estructuras especiales. Se recomienda también que los tubos se diseñen con la cantidad y colocación del acero de refuerzo requerido, de acuerdo con los esfuerzos esperados.

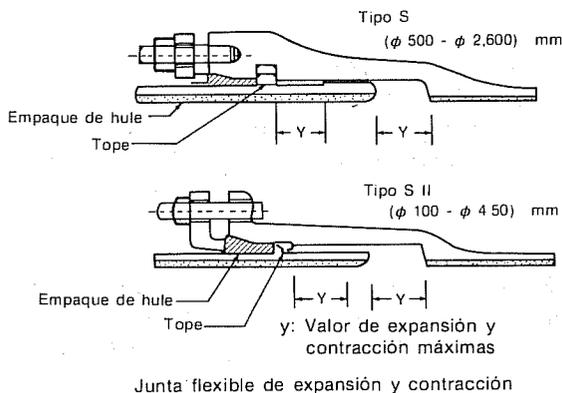
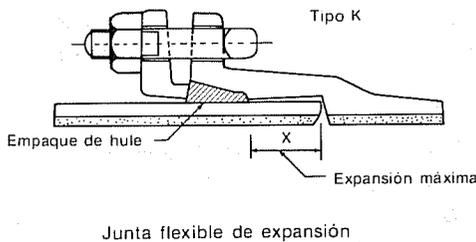
A fin de lograr cierta seguridad ante la ocurrencia de sismos, en el diseño y operación de un acueducto es necesario tomar en cuenta las fuerzas que originan cada uno de los efectos que se enlistan a continuación:

- Reducción de la capacidad de carga del suelo de soporte, debido a vibraciones sísmicas (causadas por fenómenos de licuación de suelos granulares finos saturados y fatiga de

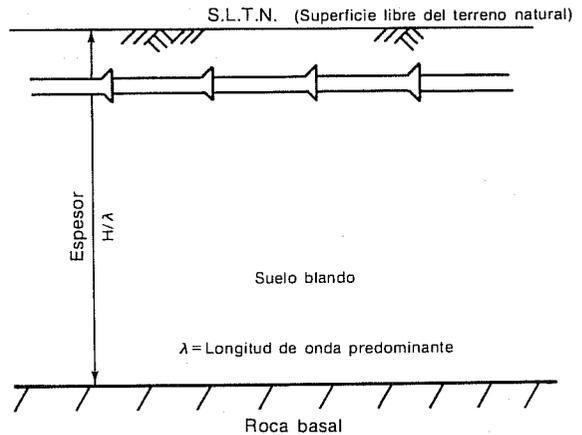
2a. Juntas flexibles, para tubos de concreto reforzado



2b. Juntas flexibles para tubos de hierro fundido dúctil



3. Area con estratos potentes de suelo blando y roca basal profunda



suelos cohesivos sujetos a ciclos de carga y descarga durante un sismo).

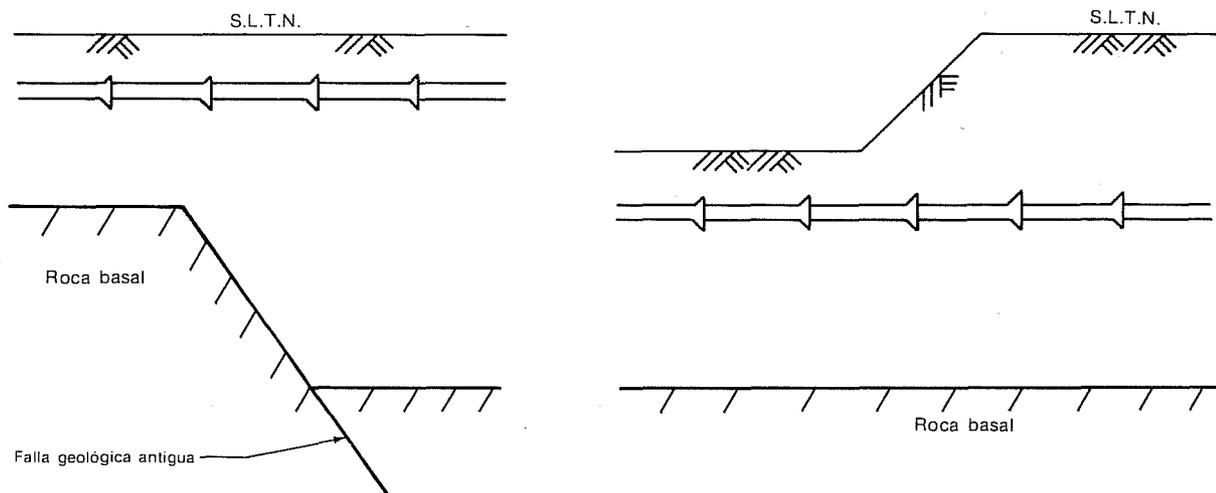
- Empuje de tierras sobre tuberías, provocado por deslizamiento de taludes y laderas.
- Distorsiones de las tuberías en la dirección axial y transversal, respecto a su eje, producidas por las acciones sísmicas descritas en los párrafos anteriores.
- Momentos flexionantes y fuerzas axiales, producidas por cambios en las propiedades dinámicas del terreno o de la tubería, a lo largo de las líneas.
- Momentos flexionantes y fuerzas cortantes en la unión de las tuberías con estructuras especiales.
- Concentración de momentos flexionantes en los cambios de dirección de la tubería.
- Presiones hidrodinámicas generadas durante la ocurrencia de un sismo, en:
 - terminales ciegas de la tubería o en válvulas cerradas
 - cambios de dirección
 - secciones T y ramificaciones en general
 - variación en los diámetros de la tubería

Aspectos críticos del diseño de acueductos ubicados en zonas sísmicas

Con base en las experiencias de daños sísmicos sobre acueductos, para seleccionar el trazo de una de estas obras se recomienda tomar en cuenta las siguientes áreas de alto riesgo, ya sea para evitarlas o para dar a la tubería el reforzamiento requerido:

- Donde el espesor del suelo que sobreyace a la roca basal es lo suficientemente grueso y de

4. Area con cambios bruscos en topografía, geología y tipo de suelo



mala calidad como para producir amplificaciones sísmicas inconvenientes (véase ilustración 4). Este es el caso del subsuelo lacustre del centro de la Ciudad de México, donde los efectos de los sismos originados en la costa del Pacífico siguen leyes de atenuación, que son función del tipo de ondas predominantes que se generan y de los 400 km de distancia entre los epicentros y dicha ciudad. Cuando las ondas sísmicas llegan a esa parte de la Ciudad de México, tanto los valores espectrales máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento como los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento se incrementan a una magnitud comparable con los valores registrados en las cercanías del epicentro, a pesar de que se trata ya de ondas filtradas a lo largo de todo el recorrido.

- Sobre rellenos blandos y terraplenes.
- Donde hay cambios bruscos en topografía, geología o tipo de suelo (véase ilustración 5).
- Suelos susceptibles de sufrir licuación (véase ilustración 6)
- Donde existe un peligro potencial de deslizamiento del terreno o bien, donde exista riesgo de asentamientos diferenciales (véase ilustración 7)
- Donde haya peligro de movimientos diferenciales por reactivación de fallas geológicas preexistentes (véase ilustración 8).
- Puntos de unión de tuberías con alguna estructura del acueducto (véase ilustración 9).
- Conectores y piezas especiales de la tubería.

- Partes de las líneas donde existen cambios de elevación, sifones invertidos, cruces con ríos y vías de comunicación en general.
- Otros (áreas sujetas a efectos hidrodinámicos).

De acuerdo con las experiencias japonesas, a fin de reducir los daños de los acueductos originados por sismos, es necesario observar los siguientes requisitos para el diseño:

- Reforzamiento del sistema

Localizar los puntos donde se concentran esfuerzos de magnitud importante durante la ocurrencia de un sismo, así como determinar la magnitud de estos esfuerzos y el diseño de los mecanismos y sistemas que permitan reforzar las tuberías.
- Pluralización del sistema

Diseñar un acueducto de manera que se cuente con dos o más fuentes de captación, para que en caso de que algún sismo dañe parte del acueducto, se pueda continuar operando.
- Interconexión de sistemas

Posibilidad de diseñar interconexiones en acueductos de poblaciones vecinas, lo que facilita la localización y reparación de daños, sin interrumpir la operación del acueducto. Para estas interconexiones es necesario planificar de manera eficiente la cantidad y localización de válvulas.
- Ramificación de sistemas

Diseñar un acueducto con ramificaciones; esto significa duplicar las líneas de conducción a lo largo de las zonas de alto riesgo sísmico, de tal forma que cuando alguna resultara dañada durante un sismo sea factible continuar operando el acueducto mientras se realizan los trabajos de reparación.

- División en bloques

La experiencia japonesa recomienda instalar válvulas de emergencia a intervalos de 500 a 1000 m para limitar los daños sísmicos y facilitar la detección y reparación de fugas.

Principios para el diseño de acueductos resistente a sismos

Para lograr diseños resistentes a sismos en sistemas de abastecimiento de agua, es preciso considerar las características que rigen el diseño en cada una de las distintas áreas por las que atraviesa un acueducto, es decir, los valores máximos espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento, de preferencia a distintas profundidades con respecto al nivel del terreno natural o por lo menos a dicho nivel, así como los periodos y/o frecuencias de vibración dominantes. Además, se debe determinar el comportamiento dinámico de cada una de las estructuras que integran el acueducto, (periodos y/o frecuencias dominantes, características de amortiguamiento y la resistencia dinámica de cada uno de los materiales). En lo que respecta al terreno de cimentación, hay que conocer su comportamiento dinámico: la rigidez dinámica correspondiente a las distorsiones angulares esperadas durante la ocurrencia del sismo de diseño (G), la relación de Poisson dinámica (ν), la densidad de masa (ρ), las características de amortiguamiento de los materiales que integran el subsuelo (h), los periodos y frecuencias naturales de vibración de cada estrato involucrado (T_m, W_m), así como la resistencia dinámica y su deterioro ante ciclos de carga repetidos. Además, en el diseño de estos sistemas es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Diseñar de forma tal que sea posible adoptar métodos que permitan localizar daños sísmicos. Esto es, establecer sistemas de monitoreo para detectar de manera continua el gasto y las presiones de operación, así como cualquier variación de éstas durante y después de la ocurrencia de un sismo.
- Determinar medidas para efectuar reparaciones de emergencia y para detectar las áreas y estructuras que tengan un riesgo sísmico importante y disponer de las refacciones, partes, equipos y herramientas en almacenamientos ubicados estratégicamente.
- Prevenir desastres secundarios. Esto se refiere específicamente a la implantación de medidas para prevenir el deterioro de la calidad del agua

ante la presencia de fallas estructurales y de operación de los acueductos, a consecuencia de un sismo.

Por otro lado, para los trabajos de abastecimiento de agua es conveniente asignar niveles de seguridad sísmica para cada estructura, en función de la importancia y vulnerabilidad de cada una de ellas, además de las consideraciones de seguridad que deben seguirse para todo el sistema de conjunto.

Secuencia para un diseño resistente a sismos

- Selección del sitio de ubicación del acueducto.
- Trabajos de investigación para determinar las características geológicas y los parámetros dinámicos del subsuelo.
- Adecuación del tipo de estructuras y métodos constructivos a las condiciones dinámicas del subsuelo.
- Selección de los elementos constructivos más adecuados.
- Cálculos relacionados con la resistencia a sismos de las estructuras.
- Comprobación de la seguridad real que se puede lograr con el diseño efectuado, a lo largo de la vida útil de la obra.
- Definición de las partes y estructuras más vulnerables a sismos, a fin de determinar las medidas de seguridad que se deberán observar durante la vida útil de la obra.

Investigaciones del subsuelo

Principios fundamentales

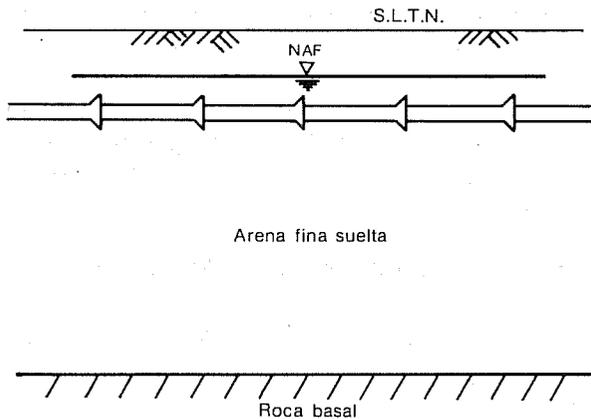
La investigación del subsuelo se deberá programar teniendo en cuenta en primer término las características de riesgo sísmico propias de cada sitio en particular y, en segundo, la importancia de la obra. A partir de esto, la investigación podrá variar en cantidad y detalles, pero no en el sentido y enfoque que se expone a continuación.

Métodos

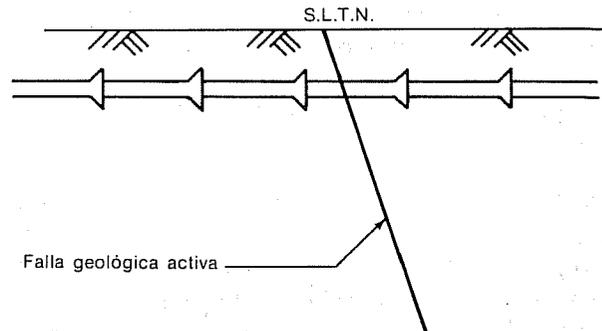
Los métodos para realizar la investigación del subsuelo se pueden separar en:

- Exploración del subsuelo, (que incluyen los métodos de campo y de laboratorio usados normalmente en la ingeniería de suelos). Estos deberán permitir la determinación confiable de las características geológicas, la estratigrafía y

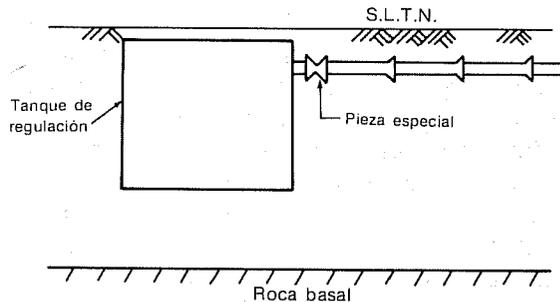
5. Area con suelo susceptible de sufrir licuación



7. Area con peligro de movimientos diferenciales por reactivación de fallas geológicas preexistentes



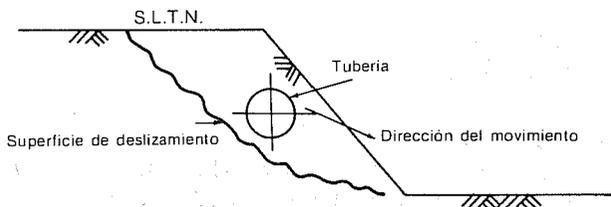
8. Unión de tuberías con estructuras especiales del acueducto



las propiedades mecánicas del subsuelo, según su:

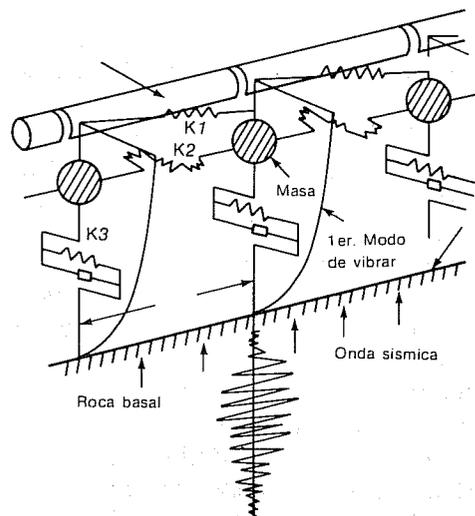
- Clasificación y estratigrafía
 - Espesor de estratos
 - Profundidad del nivel freático
 - Valor N de penetración estándar
 - Resistencia al esfuerzo cortante de cada estrato
 - Módulo de elasticidad E de cada estrato
 - Módulo dinámico de rigidez G de cada estrato
 - Densidad de masa de cada estrato
 - Distribución granulométrica de cada estrato
 - Características de plasticidad de los materiales finos
- Medición directa de los parámetros dinámicos del subsuelo, efectuando pruebas tanto de campo como de laboratorio, para definir con confiabilidad los siguientes factores:
 - Velocidad de ondas elásticas (velocidad de ondas sísmicas longitudinales V_p , velocidad de ondas sísmicas transversales V_s).
 - Módulo de reacción K al nivel de contacto de la tubería con el subsuelo.

6. Area en peligro potencial de deslizamiento

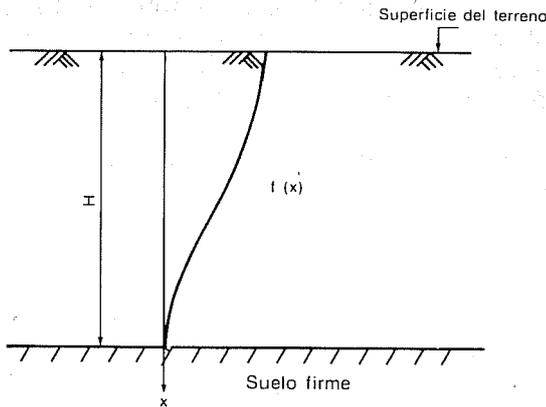


9. Modelo usado en el método dinámico

(El significado de los litorales de esta figura está descrito en la tabla del análisis dinámico)



10. Configuración del modo de vibrar



- Periodos dominantes del subsuelo determinados mediante pruebas de campo y laboratorio, aunque en realidad es más conveniente y representativo contar con instrumentación de campo que permita medir directamente las características del subsuelo a distintos niveles, durante la acción de sismos reales.

Para medir los parámetros dinámicos del subsuelo no se debe perder de vista la influencia de los niveles de deformación angular. Por supuesto que si las mediciones se efectúan directamente en el campo durante sismos grandes, los parámetros dinámicos representarán las condiciones reales de trabajo de las estructuras, sobre todo en lo que se refiere a:

- Módulo dinámico de rigidez
- Coeficiente de amortiguamiento
- Relación de Poisson dinámica
- Resistencia dinámica al esfuerzo cortante
- Con base en los dos tipos de información arriba descritos se podrá determinar en forma confiable la naturaleza propia del comportamiento dinámico de las estructuras, líneas de conducción y estructuras especiales, efectuando para ello un análisis de la interacción suelo-estructura.

Licuación de suelos granulares

Es importante mencionar que se deberá tener sumo cuidado cuando las estructuras especiales y las líneas de conducción tengan que apoyarse en terrenos arenosos sueltos con niveles freáticos someros (como ocurre en las costas del país).

En estos casos es absolutamente indispensable determinar el potencial de licuación, para que en los diseños se considere la disminución parcial o casi total de la capacidad de carga del terreno como consecuencia de un fuerte aumento en la presión de agua interangular. Con esto será posible tomar las medidas apropiadas para el mejoramiento del terreno o el diseño de la tubería, a fin de contar con la flexibilidad y resistencia necesarias, o en su defecto, tomar la decisión de no construir en un área problemática.

Para determinar el potencial de licuación se recomienda alguno de los métodos que permita correlacionar de manera directa la información de campo con las características dinámicas de comportamiento. (National Academy of Sciences, 1985; Seed y Hom, 1987 y Seed e Idris, 1971). También se puede recurrir a un método similar al que utiliza el Ministerio de Construcción del gobierno japonés (Iwasaki, 1986).

Métodos de análisis

Los métodos de cálculo usados en Japón para el diseño resistente a sismo de tuberías enterradas son: coeficiente sísmico; coeficiente sísmico modificado, deformación sísmica y análisis dinámico.

Cuando se requiere conocer con detalle el comportamiento estructural de una línea de conducción sujeta a sismo, es necesario verificar los resultados obtenidos con cualquiera de los tres primeros métodos empleando el análisis dinámico. No obstante, el que más se usa en la actualidad es el de la deformación sísmica, debido a la sencillez de aplicación y a la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Método de la deformación sísmica

Este método permite estimar la amplitud del desplazamiento que experimenta el subsuelo que aloja a una tubería enterrada, considerando los efectos que produce el paso de ondas sísmicas; para ello se usa el espectro de respuesta de velocidad correspondiente, con base en la siguiente ecuación:

$$U_H(X) = \frac{2}{\pi^2} S_v T g K_H^l \cos \frac{\pi x}{2H} \quad (1)$$

que permite determinar la amplitud de deformación horizontal en (cm) $U_H(X)$, como una

función de X medida en metros, donde X representa a la profundidad bajo la superficie del terreno a la que se encuentra alojada la tubería, donde:

S_v : respuesta espectral de velocidad en cm/s

T_g : periodo natural del subsuelo en s

K'_H : coeficiente sísmico horizontal, designado al nivel de la roca basal

H : espesor del suelo blando

El valor de respuesta espectral de velocidad que se usa en el análisis, se determina de acuerdo con el periodo natural de vibración del subsuelo (T_G).

Conviene notar que cuando sea necesario analizar los efectos en las tuberías enterradas, debidos a desplazamientos verticales, deberá considerarse:

$$U_v = \frac{U_H}{2} \quad (2)$$

donde U_v representa la deformación en el sentido vertical, en función de la amplitud de deformación horizontal U_H .

Mediante este método se pueden determinar los esfuerzos axiales y transversales que actúan sobre las tuberías, así como las expansiones, contracciones y ángulos de deflexión que se presentarán en las juntas entre tramos de tuberías. Los detalles de este método aparecen en Iwasaki, 1984.

Método dinámico

Este método consiste en un análisis de respuesta multiparticular, donde el subsuelo se representa por un gran número de pequeñas masas unidas por resortes y amortiguadores. Aquí se supone que la roca basal, la estratigrafía del subsuelo blando y la tubería forman un conjunto interconectado que se estudia cuando está bajo los efectos de respuesta a las vibraciones que transmite la roca basal. Este método parte de las consideraciones siguientes:

- Las tuberías enterradas no alcanzan la resonancia en el terreno.
- La magnitud de la deformación que experimentan las tuberías enterradas está determinada por la rigidez del tubo y del subsuelo en forma simultánea.
- En lo que se refiere a las vibraciones del terreno, se toman en cuenta aquellas que corresponden al paso de las ondas sísmicas al cortante.

- Cada elemento del terreno está representado por un sistema de partículas. Las ramificaciones y juntas de las líneas de tuberías tienen la libertad necesaria para expandirse, contraerse y sufrir flexiones o rotaciones. (Este método se detalla en Obinata y Hoshiba, 1986).

Modelo para analizar la respuesta de las tuberías

El modelo para el análisis de respuesta se muestra en la ilustración 10. A continuación se describen las funciones que definen la rigidez de los resortes K_1 , K_2 y K_3 , los parámetros más importantes que intervienen en el modelo.

Resorte	Función	Parámetros más importantes
K_1	Transmite la vibración del terreno a la tubería	K: Módulo de rigidez del subsuelo
K_2	Muestra la relación entre diferentes masas de subsuelo	E: Módulo de Young del terreno G: Módulo dinámico de rigidez del subsuelo I: Distancia entre masas del subsuelo
K_3	Transmite la vibración de la roca basal a las masas de subsuelo blando	M: Masa efectiva del subsuelo T: Periodo natural del terreno H: Características de amortiguamiento del terreno

La masa efectiva M del suelo, se obtiene mediante la relación: $M = ml'$, donde l' es la distancia entre partículas de masa efectiva (M), mientras que m representa directamente la masa del suelo por unidad de longitud y está dada por:

$$m = \gamma l^2$$

donde

$$dm = \int_0^H \gamma F(X) dx \quad (3)$$

(véase ilustración 11). Aquí:

H = espesor de suelo blando

γ = peso volumétrico del suelo

X = distancia medida en dirección vertical

$F(X)$ = configuración del modo con que vibra el terreno blando, tomando como origen de deformaciones a la roca basal.

La configuración del modo con que vibra el terreno blando se determina a partir de la siguiente expresión:

$$F(X) = a \cdot f(X) \quad (4)$$

donde:

$f(X)$ = configuración del modo de vibrar del terreno blando, por efectos de la aceleración aplicada al paso de las ondas sísmicas

a = aceleración del terreno

La metodología y práctica del análisis dinámico se pueden resumir en los siguientes términos. (Tamura, Okamoto y Hamada, 1975):

- Para el análisis dinámico se pueden emplear registros sísmicos, o espectros de respuesta promedio.
- Los registros sísmicos que se empleen en este análisis deben reflejar la información propia de las condiciones geológicas del sitio de la obra y sus características sísmicas.
- Los espectros de respuesta usados para el análisis deberán incluir las características de los movimientos sísmicos descritos en el punto anterior, o, en su defecto, se podrán emplear espectros de respuesta promedio, siempre y cuando la decisión del sistema de diseño se tome con base en el sismo máximo y el periodo de recurrencia correspondiente.

Resumen de criterios y medidas para la seguridad sísmica de los sistemas de abastecimiento de agua, a partir de la experiencia japonesa.

- La planeación, diseño y construcción de estructuras deben efectuarse a partir de estudios, mediciones y consideraciones adecuadas, desde el punto de vista de ataques sísmicos.
 - Cada una de las estructuras que integran un acueducto deberá diseñarse bajo cálculos racionales a partir del sismo de diseño que corresponda a cada sitio, de manera congruente con las características geológicas y estratigráficas.
 - Los acueductos deben construirse con las medidas de protección necesarias, de tal forma que sean capaces de mantener su funcionalidad tanto como sea posible, aun después de un sismo devastador.
 - Es deseable que los sistemas de abastecimiento de agua se construyan a lo largo de sitios seguros y estables; cuando esto no sea posible, deberán adoptarse métodos estructurales adecuados que garanticen resistencia sísmica.
- Deberán emplearse componentes y materiales de la más alta calidad para resistir el sismo de diseño.
 - Cuando se prevean desplazamientos alternantes entre las partes y componentes que integran un acueducto, deberán incluirse juntas flexibles que permitan absorber deformaciones y atenuar esfuerzos.
 - Puesto que es casi imposible, tanto técnica como económicamente, construir obras por completo resistentes a sismos, es necesario implantar las siguientes medidas de emergencia:
 - Localizar los puntos y áreas más vulnerables, de acuerdo con lo descrito en este trabajo.
 - Programar los trabajos de reparación posteriores a un sismo, de tal forma que resulten lo más simple posible.
 - Programar la reserva de materiales, piezas, refacciones, herramientas y equipos que deberá mantenerse almacenada en lugares próximos a las fallas previstas.
 - Implantar contramedidas para prevenir daños secundarios originados por el sismo.
 - Para líneas de conducción, transmisión y distribución, se recomienda disponer de interconexiones mutuas entre diferentes sistemas que se pueden efectuar entre poblaciones vecinas.
 - Deberán observarse los reglamentos del gobierno federal o local cuando prescriban sobre los materiales componentes y métodos. En cada caso particular, los criterios técnicos y estándares publicados por sociedades y asociaciones de ingeniería, que reflejen experiencias prácticas y racionales, deberán seguirse tanto como sea necesario.
 - Para el mantenimiento y control de los abastecimientos de agua, es indispensable efectuar inspecciones y pruebas frecuentes, a fin de mantener las características de diseño resistente a sismo. De ser factible, se deberá tratar de incrementar la seguridad con el tiempo, mediante modificaciones y adaptaciones subsecuentes, sobre todo si se cuenta con información de instrumentación sísmica en la obra.
 - Para cumplir con el punto anterior, se recomienda integrar sistemas de instrumentación racionales, simples y no necesariamente costosos, que permitan monitorear el comportamiento sísmico de las estructuras a lo largo de todo el acueducto.

- Dado que es de esperarse que las obras de este tipo sufran algún daño en mayor o menor grado durante un sismo, es deseable tener presente las siguientes medidas complementarias:
 - Determinación de la magnitud y extensión probable de daño sísmico.
 - Abastecimiento de agua de emergencia en función del punto anterior.
 - Recuperación de líneas de tuberías, a partir del programa de restauración de emergencia que se establezca.
 - Estructuración de un sistema de rehabilitación y ayuda mutua.
 - Es recomendable tener disponible información referente al funcionamiento del acueducto, dibujos y planos de las obras.

Conclusiones

Los sismos de septiembre de 1985 que afectaron a los sistemas de abastecimiento de agua potable de algunas ciudades del país, en especial en la Ciudad de México, resaltan la necesidad de dar atención y dedicar esfuerzos para protegerlos. Por tal motivo, se ha asimilado la tecnología con que cuentan países desarrollados como Japón, adaptándola a las características y problemática de México.

De manera especial, en el resumen de criterios y medidas de este trabajo, se manifiesta la posibilidad de establecer medidas de protección en sistemas mexicanos. Sin embargo, destaca la necesidad de contar con más información referente al comportamiento dinámico de las formaciones geológicas de las zonas de más alto riesgo sísmico. Para ello, conviene realizar un esfuerzo conjunto de especialistas, instituciones y empresas, a fin de desarrollar sistemas, métodos y equipos de instrumentación que permitan efectuar diseños apropiados, no solamente de acueductos y líneas vitales en general, sino de toda obra de ingeniería necesaria para el desarrollo de México.

Por otra parte, para lograr los niveles de seguridad requeridos, es necesario establecer un intercambio de experiencias entre los ingenieros que tienen a su cargo el diseño, construcción y operación de los sistemas de abastecimiento

de agua y los fabricantes de tubos y piezas especiales.

Referencias

- Flores Berrones, R. "Efectos sísmicos en tuberías subterráneas para agua potable en México", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 1, núm. 4, II Epoca. septiembre-diciembre, 1986.
- Iwamoto, T., Wakai, N. y Yamaji, T. "Observation of dynamic behavior of buried pipelines during earthquakes", *VIII Congreso Mundial sobre Ingeniería de Sismos*, San Francisco, julio, 1984.
- Iwasaki, T. "Earthquake-resistant design of underground pipelines in Japan", *Taller de Japón-EUA sobre comportamiento sísmico de tuberías enterradas y sistemas de telecomunicación*, Tsukuba Science City, Japón, diciembre, 1984.
- Iwasaki, T. "Soil liquefaction studies in Japan, state of the art", *Public Works Research Institute Ministry of Construction*, 1986.
- Kuribayashi, E. y Kawashima, K. "Earthquake resistant design of submerged tunnels and an example of its application", *Public Works Research Institute*, Ministry of Construction Government of Japan, noviembre, 1976.
- National Academy of Sciences. "Liquefaction of soils during earthquakes", *Committee on Earthquake Engineering*; Commission on Engineering and Technical systems National Research Council. National Academy Press, 1985.
- Obinata, N. y Hosiba, Y. "Seismic response of submerged tunnels subjected to propagating input motions", *VII Simposio sobre Ingeniería Sísmica japonesa*, diciembre, 1986.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *ASCE*, vol. 97, núm. SM9, septiembre, 1971.
- Seed, H.B. Ugas C. y Lysmer J. "Site dependent spectra for earthquake resistant design", *Informe núm. FERC 74-12*, Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley, noviembre, 1974.
- Seed, H.B. y Hom M. "Design problems in soil liquefaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 113, núm 8, agosto, 1987.
- Tamura, C., Okamoto, S. y Hamada, M. "Dynamic behavior of a submerged tunnel during earthquakes", *Report of the Institute of Industrial Science*, University of Tokio, marzo, 1975.