

MODELAMIENTO CON CENTRIFUGA DE LA RESPUESTA DE PILOTES DE FUNDACION AL CORRIMIENTO LATERAL DE SUELOS LICUADOS

Lenart González

Depto. de Ingeniería Civil y Medioambiente, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, EE.UU.
gonzal@rpi.edu

Ricardo Dobry

Depto. de Ingeniería Civil y Medioambiente, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, EE.UU.
dobryr@rpi.edu

Tarek Abdoun

Depto. de Ingeniería Civil y Medioambiente, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, EE.UU.
abdout@rpi.edu

RESUMEN

El corrimiento lateral del suelo inducido por licuación continúa siendo una causa importante de daño sísmico a las fundaciones profundas. Ensayos recientes de modelos de pilotes en centrífugas y mesas vibratoras indican que la permeabilidad de la arena licuada es un factor muy importante. Este artículo presenta resultados y análisis de uno de los ensayos llevados a cabo en la centrifuga geotécnica de RPI para investigar el efecto de la permeabilidad del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MODELAMIENTO CON CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Los primeros ensayos a escala con centrífugas geotécnicas de modelos de sistemas de suelo y suelo-estructura se realizaron en el año 1936. A comienzos de la década del 70 hubo un rápido aumento en el interés por realizar este tipo de ensayos, los cuales han demostrado ser una técnica efectiva para modelar físicamente la respuesta del suelo y la interacción suelo-estructura. Actualmente un número importante de centros de investigación en el mundo que tienen una centrifuga cuenta además con capacidad de modelamiento de la carga sísmica.

Una centrifuga (como la de la Fig.1) es un equipo que al girar genera un elevado campo gravitacional artificial. Cuando el brazo gira en torno al eje, la plataforma y modelo rotan gradualmente alrededor de 90°. Para simular los esfuerzos estáticos, un modelo a escala de suelo o suelo-estructura es sometido a una aceleración centrífuga, por lo general entre 30 y 120 veces la aceleración de gravedad. Una vez que se alcanza la aceleración deseada, se aplica un registro de aceleración a la base del modelo si se desea simular la excitación dinámica. Un sistema de adquisición de datos y mini-sensores se usa para registrar la respuesta del modelo durante esta carga sísmica. El modelamiento con centrifuga es útil para estudios de fenómenos en los cuales la fuerza de gravedad tiene una influencia dominante en las propiedades de los materiales, tales como suelos y sistemas suelo-estructuras. En general, las propiedades de estos sistemas son fuertemente dependientes de los esfuerzos debido al peso propio.

El principio fundamental de modelamiento con centrífuga es que un modelo a escala $1/N$ sometido a una aceleración de N veces g esta sujeto a los mismos esfuerzos que en el prototipo, donde N es el factor de escala y g es la aceleración de gravedad. Si en el modelo se utiliza el mismo suelo que en el prototipo (terreno), se preserva la relación esfuerzo-deformación en puntos equivalentes en el modelo y prototipo. Por ejemplo, si la centrífuga gira hasta alcanzar $100 g$, un modelo de 30 cm de alto representa un prototipo de 30 metros de altura. La Tabla 1 presenta una lista de relaciones de escala en el modelamiento con centrífuga (Whitman y Arulanandan, 1985). Las relaciones de escala de tiempo presentan un problema cuando se modela la licuación de arenas, fenómeno que involucra un movimiento relativo entre el fluido y las partículas de suelo. Esto se debe a que el tiempo (dinámico) asociado con las aceleraciones, esfuerzos y deformaciones sísmicas en el suelo es escalado por $1/N$, mientras que el tiempo (difusión) para la disipación de presión de poros y consolidación es escalado por $1/N^2$. Esto significa, por ejemplo, que si un modelo compuesto por arena fina es saturado con agua, y es girado hasta alcanzar una aceleración de $30 g$, el modelo simula una arena gruesa saturada con agua, teniendo una permeabilidad 30 veces mas grande que la deseada. Se puede alcanzar una escala única de tiempo de $1/N$ que satisface simultáneamente el efecto dinámico y la disipación de presión de poros, si se usa en el modelo un fluido con una viscosidad 30 veces la viscosidad del agua. El aumento de la viscosidad se logra por lo general usando un compuesto glicerina/agua, metulosa/agua u o tro líquido viscoso similar.

1.2. CENTRIFUGA GEOTÉCNICA EN RENSSLAER POLYTECHNIC INSTITUTE (RPI)

La centrífuga geotécnica de RPI (Fig.1) fue construida en 1989 y comenzó a usarse para modelación dinámica en 1991. Tiene un radio de 3 metros y una capacidad de carga de 1.5 toneladas a $100 g$. La centrífuga de RPI fue seleccionada el año 2000 como uno de los 15 sitios experimentales de NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation), red de simulación creada por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de EE.UU. como parte de un plan estratégico para revolucionar la investigación de ingeniería antisísmica en este país. Estos centros recibieron varios millones de dólares cada uno entre los años 2000 y 2004 para desarrollar e instalar nuevos equipos, incluyendo la introducción de las últimas tecnologías experimentales y de medición. Los 15 centros fueron integrados entre si y con poderosos centros computacionales en una red electrónica a través de Internet II. Durante la primera etapa de NEES, que acaba de finalizar en Septiembre de 2004, la centrífuga de RPI fue mejorada considerablemente y conectada a una red electrónica de alta velocidad. Los principales equipos implementados en esta etapa fueron un robot con 4 grados de libertad y una mesa vibradora en dos dimensiones, los cuales permiten: (1) realizar simulaciones sísmicas mas realistas, (2) llevar a cabo un número de operaciones durante los ensayos de

Tabla 1: Relaciones de escala en el modelamiento con centrífuga

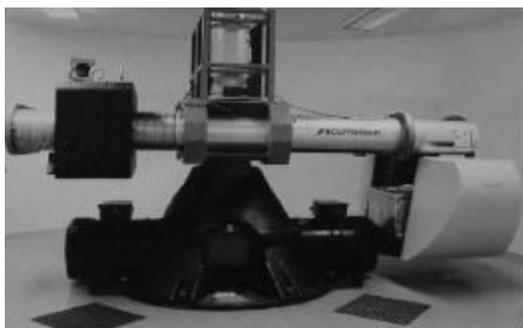


Fig.1: Centrífuga geotécnica en RPI

Parámetro	Unidades (modelo)	Unidades (prototipo)
Largo	1	N
Área	1	N^2
Volumen	1	N^3
Aceleración	1	$1/N$
Frecuencia dinámica	1	$1/N$
Esfuerzo	1	1
Deformación (%)	1	1
Tiempo:		
dinámico	1	N
difusión	1	N^2

una manera mas realista sin tener que detener la centrifuga, y (3) monitorear ensayos de manera mas detallada y producir mas y mejores resultados, alcanzando finalmente una mejor representación de los modelos. El uso de un denso arreglo de sensores y cámaras de alta velocidad proveen gran resolución de la respuesta del modelo y son muy útiles para crear visualizaciones de los ensayos, sistemas de identificación y simulaciones numéricas (Zeghal et al., 2002).

1.3. PILOTES DE FUNDACIÓN SOMETIDOS A CORRIMIENTO LATERAL DEL SUELO

El corrimiento lateral del suelo inducido por licuación de depósitos con algún grado de inclinación y/o cercanos al borde costero continua siendo una causa importante de daño sísmico a las fundaciones profundas. En Estados Unidos, Méjico, Costa Rica, Turquía y otros países, edificios, puentes, estructuras portuarias y otras estructuras apoyadas sobre fundaciones profundas han sido dañadas en varios terremotos, con miles de millones de dólares en daños. El corrimiento permanente del terreno induce grietas y fallas en los pilotes tanto cerca de la superficie como a mayores profundidades, rotura de conexiones, y corrimientos y rotaciones permanentes de pilotes con el correspondiente efecto sobre la superestructura. (Hamada et al., 1986; Mizuno, 1987; O'Rourke y Hamada, 1992; Yokoyama et al., 1997; Tokimatsu, 1999; Dobry y Abdoun, 2001).

Aun cuando en algunos casos la cabeza del pilote se desplaza lateralmente una distancia similar a la del terreno en el campo libre, en otros casos el pilote se mueve mucho menos debido al efecto restrictivo de la superestructura, o a la rigidez lateral de la fundación (caso de grupos de pilotes de punta). La fundación profunda puede ser sometida a grandes presiones laterales del suelo, especialmente debidas a las presiones pasivas de capas superficiales no licuables ubicadas sobre la capa licuable. En algunas ocasiones, el suelo ha fallado antes que la fundación, la cual ha sufrido poco daño debido al pequeño corrimiento de la cabeza de la fundación y superestructura (Berrill et al., 1997); mientras que en otras, la fundación ha fallado primero debido a los momentos de flexión y gran deformación y/o rotación permanente de la cabeza de los pilotes. Los daños de los pilotes por lo general se concentran en los límites superior e inferior de la capa licuada, lugar donde se produce un repentino cambio en las propiedades del suelo. Mayores daños tienden a ocurrir cuando existe un estrato superficial no licuable que fuerza el corrimiento lateral de la fundación, que cuando todo el estrato se licua y los pilotes son sometidos a fuerzas necesariamente limitadas por la baja resistencia del suelo después de licuado.

1.4. PRÁCTICA E INCERTIDUMBRES ACTUALES

Casos históricos y ensayos experimentales usando mesas vibratorias a 1g y en centrífugas geotécnicas, indican que el efecto del corrimiento lateral del suelo en los pilotes puede ser caracterizado en primera aproximación como un fenómeno pseudo-estático de interacción suelo-estructura, determinado por el desplazamiento lateral permanente del terreno en el campo libre. Varios análisis y métodos de diseño han sido propuestos, donde el suelo aplica fuerzas laterales estáticas a la fundación, ya sea (i) en función del desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo en el campo libre (método p-y); o (ii) usando las máximas fuerzas laterales posibles dependiendo de la resistencia del suelo, dentro de un método de equilibrio limite. Un tercer procedimiento (iii) sugerido por varios investigadores japoneses, asume que el suelo licuado es un fluido viscoso y por lo tanto las fuerzas laterales estáticas son función de la velocidad relativa, en vez del desplazamiento relativo entre el pilote y el suelo en el campo libre (Higuchi y Matsuda, 2002).

Actualmente existe una gran incertidumbre asociada con la máxima presión y fuerzas laterales aplicadas por el suelo licuado, lo que se traduce en una gran incertidumbre en la estimación de los máximos momentos de curvatura en el pilote. Por ejemplo, el método de la Asociación de Caminos de Japón (JRA) especifica la presión lateral a una determinada profundidad como un

30% de la presión vertical total (Reese et al., 1974; Berrill et al., 1997; Yokoyama et al., 1997; Dobry et al., 2003), mientras que Abdoun et al. (2003) han recomendado una presión lateral constante con la profundidad de 10 kPa. Para un rango de condiciones de terreno involucrando pilotes aislados (pero no necesariamente grupos de pilotes), los métodos de Abdoun y la JRA dan resultados similares. Sin embargo, una principal fuente de incertidumbre es el área sobre el cual se aplica la presión en el caso de un grupo de pilotes. Yokoyama et al. (1997) sugieren que el valor de la presión lateral tiene que multiplicarse por toda el área del grupo de pilotes, incluyendo el suelo entre los pilotes, lo cual para una separación de $3d$ (d = diámetro del pilote) puede dar una fuerza de hasta tres veces mayor que en el caso de aplicar la presión lateral solo a los pilotes y no al suelo entre ellos.

Por otra parte, ensayos recientes en centrífugas y en mesas vibratoras a 1g (a escala reducida y a escala real) de pilotes aislados y de grupos de pilotes, indican que la permeabilidad de la arena licuada es un factor extremadamente importante y poco comprendido. Varios investigadores han encontrado recientemente que la resistencia del suelo licuado al movimiento de un objeto (pilote, cilindro, esfera, etc.) aumenta a medida que aumenta la velocidad relativa entre el objeto y el suelo. Estos resultados tenderían a confirmar la suposición de que el suelo licuado puede ser modelado como un fluido viscoso (Dungca et al., 2004; De Alba y Ballesteros, 2004; Hwang et al., 2004). Dungca et al. realizaron una serie de ensayos a escala reducida en una mesa vibradora a 1g para estudiar la resistencia lateral de un pilote sometido a flujo lateral inducido por licuación, donde modeló el pilote como un cilindro sumergido. Los resultados revelan que la tasa de migración del fluido, es decir la conductividad hidráulica del suelo con respecto a la velocidad de aplicación de la carga, es el factor crucial para la movilización de la resistencia lateral de un cilindro sumergido en suelo licuado. Mientras mayor es esta tasa, más le cuesta al fluido trasladarse desde el campo libre para disipar las presiones de poro negativa generadas cerca del pilote u otro objeto.

Una serie de ensayos se llevaron a cabo en la Centrífuga Geotécnica de RPI para investigar el efecto de la permeabilidad del suelo en la respuesta de pilotes aislados y grupo de pilotes sometidos a deformaciones laterales del terreno inducidas por licuación (González et al., 2004). Más específicamente, seis modelos simulando un depósito con una leve inclinación, con una capa licuable sobre una capa no licuable, fueron ensayados en una caja laminar (Fig. 2). Esta caja laminar está compuesta por 39 anillos rectangulares de aluminio separados por rodamientos, de manera de permitir que el movimiento relativo entre los anillos se produzca con un mínimo de fricción. Uno de los modelos consistió en un pilote aislado (modelo 1x1-w), otro modelo fue una línea de tres pilotes con cabezal común perpendicular a la dirección del corrimiento del terreno (modelo 3x1-w), y un tercer modelo consistió en un grupo de pilotes de 2x2 con cabezal común (modelo 2x2-w). Estos tres modelos fueron ensayados usando agua como fluido de saturación de la arena. Otros tres modelos fueron repetidos idénticamente, usando la misma arena "Nevada sand" y la misma excitación sísmica en la base, pero saturados esta vez con un líquido viscoso (modelos 1x1-v, 3x1-v y 2x2-v respectivamente). Por lo tanto los tres pares de modelos simularon dos arenas de permeabilidades muy distintas en el terreno. La importancia de la permeabilidad de la arena licuada se puede ilustrar comparando resultados de los dos modelos que simularon un grupo de pilotes de 2x2. En el modelo 2x2-w (saturado con agua), el cabezal del grupo de pilotes alcanzó un máximo desplazamiento de 7 cm y un máximo momento de flexión de 55 kN-m en unidades de prototipo, mientras que en el modelo 2x2-v (saturado con líquido viscoso) el cabezal alcanzó un máximo desplazamiento de 45 cm y un máximo momento de flexión de 375 kN-m al final de la excitación. Esto es un factor de $375/55 \sim 7$ entre máximos momentos de flexión. Por lo tanto, la incertidumbre en las fuerzas laterales del suelo y los momentos de flexión en la fundación, debido al poco entendimiento del complejo comportamiento del suelo licuado cerca de los pilotes de fundación, puede traducirse en fuerzas laterales y momentos de flexión que varían hasta por factores de 3 ó 7. Es necesario reducir esta enorme incertidumbre a un valor más razonable para poder desarrollar métodos racionales de análisis y diseño sísmico de fundaciones profundas sometidas al corrimiento del terreno debido a la licuación del suelo.

2. MODELAMIENTO CON CENTRÍFUGA DE UN PILOTE DE FUNDACIÓN AISLADO

Este artículo presenta resultados y análisis del ensayo centrífugo correspondiente al modelo 1x1-v ya mencionado. La Fig. 2 presenta la caja laminar, los estratos de suelo, modelo del pilote, e instrumentación usada en este experimento. La altura del modelo fue aproximadamente de 0.16 m, simulando a 50 g un prototipo de 8 m de alto. Los estratos consistieron de una capa de 6 m de arena suelta "Nevada sand" depositada a una densidad relativa de 40% aproximadamente, sobre una capa de 2 m de arena cementada. El pilote aislado estaba fijo en la capa no licuable, simulando así un pilote de punta empotrado en la capa firme de base. Esta capa no licuable, que consistió de la misma arena "Nevada sand" pero con un pequeño porcentaje de cemento, fue depositada mediante pluviación en seco y humedecida posteriormente con agua. Después de 24 horas, la capa licuable fue también depositada mediante pluviación en seco y después saturada con una solución agua-metulosa que tenía una viscosidad cercana a 50 veces la viscosidad del agua, simulando así un estrato de arena fina en el terreno. El pilote fue instalado en el modelo antes de colocar la arena, simulando así un pilote pre-excavado, instalado con un mínimo de efecto sobre el suelo adyacente. El pilote consistió de una barra de material polímero de 0.95 cm de diámetro, que simuló a 50 g un pilote en terreno de 47.5 cm de diámetro con una rigidez a la flexión (E) de 9000 kN-m². Después de instalar strain gauges a lo largo del pilote, éste se cubrió con una pequeña capa de cera y un tubo de goma muy delgado para proteger y aislar los sensores. Finalmente, se pegaron granos de arena al pilote para crear una fricción adecuada entre el suelo y el pilote, representando así la fricción existente entre la arena y un pilote de hormigón armado en el terreno. El diámetro final del pilote en unidades de prototipo fue de 60 cm. Además de los strain gauges para medir el momento de flexión a lo largo del pilote, se contaba con LVDTs para medir el desplazamiento lateral de éste, el suelo fue instrumentado con transductores de presión de poros y acelerómetros, y se instalaron también LVDTs en los anillos de la caja laminar para medir la deformación del suelo en el campo libre. Arena de color se utilizó a distintas profundidades para observar el patrón de deformación del suelo alrededor del pilote una vez terminado el ensayo. El modelo estaba inclinado 2° con respecto a la horizontal (Fig.2), lo cual simuló un terreno con una suave inclinación de 4.8°, después de realizar las correcciones pertinentes. Una vez alcanzada la aceleración deseada de 50 g para este modelo de 50:1, la caja laminar fue excitada en la base con una señal sinusoidal de 30 ciclos, amplitud de 0.3 g y frecuencia de 2 Hz en unidades de prototipo (ver señal A0 en la Fig.3). Los resultados e interpretación de este ensayo se presentan a continuación.

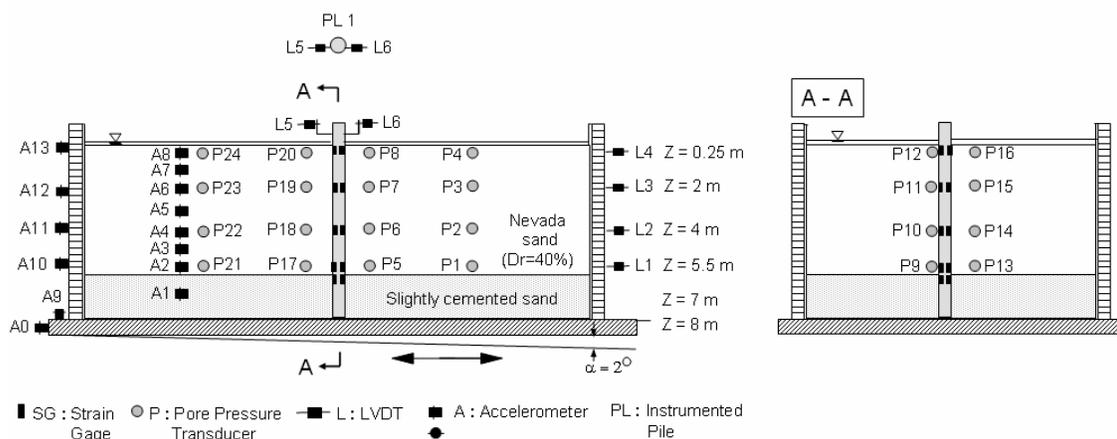


Fig.2: Esquema de la caja laminar e instrumentación usada en los modelos 1x1-w & 1x1-v

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DEL MODELO 1x1 -v

La aceleración aplicada a la base del modelo (registrada), así como las aceleraciones medidas en el suelo a distintas elevaciones durante la excitación basal se presentan en la Fig.3. Los correspondientes acelerómetros estaban ubicados a una distancia razonable del pilote con el fin de representar el campo libre. La amplitud de las aceleraciones registradas cerca de la superficie y a una profundidad de 2 m disminuyó considerablemente después del primer ciclo de excitación debido al proceso de licuación y correspondiente aislamiento dinámico de las capas de suelo superficial. Todos los registros de aceleraciones en el suelo en la Fig. 3 contienen grandes caídas en cada ciclo, debidas al comportamiento dilatante de la arena suelta saturada durante el proceso de corrimiento lateral de la capa de suelo. La capa de arena cementada entre 6 y 8 m de profundidad se comportó como un bloque rígido durante la excitación, como se ilustra por el registro de aceleración que es idéntico a la excitación basal.

En el modelo se instalaron una gran cantidad de transductores de presión de poros, a una distancia razonable, cerca, y muy cerca (al lado) del pilote (Fig.2). Estos registros son muy importantes para comprender el efecto de la viscosidad del fluido en la respuesta de los pilotes de fundación. A una distancia razonable del pilote, los registros (P1, P2, P3, P4) revelan que el suelo se licua después de uno o dos ciclos de excitación (Fig.4), consistente con la tendencia exhibida por los registros de aceleración del suelo. Sin embargo, cerca de la superficie el exceso de presión de poros disminuyó considerablemente en cada ciclo alcanzando incluso valores negativos, lo que se mantuvo durante toda la excitación basal. Grandes deformaciones de corte generadas bajo un pequeño esfuerzo de confinamiento y un proceso lento de disipación serían al parecer responsables por este fenómeno. Estas grandes caídas de presión de poros están directamente relacionadas a las caídas de aceleración debido al comportamiento dilatante. Una vez finalizada la excitación, se produjo la disipación del exceso de presión de poros, la cual tomó más de cinco minutos en unidades de prototipo (González et al., 2004). La Fig.4 también muestra los excesos de presión de poros medidos al lado del pilote. Cerca de la superficie también se desarrollaron valores negativos (P12), sin embargo en

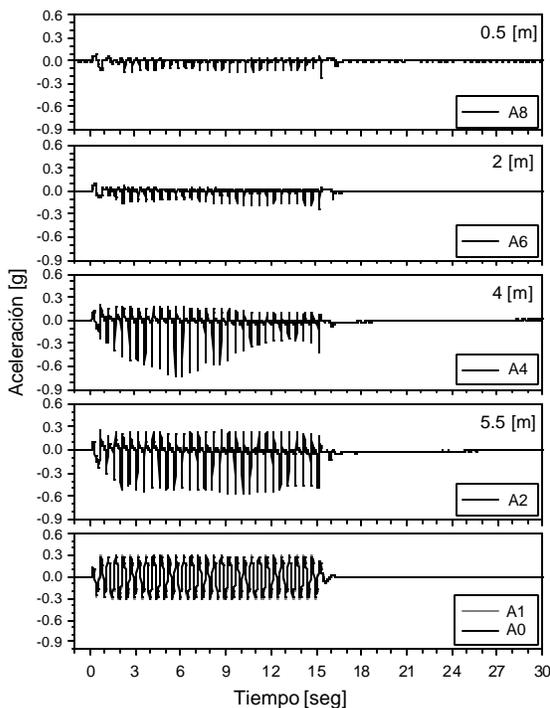


Fig.3: Registro de aceleraciones del suelo

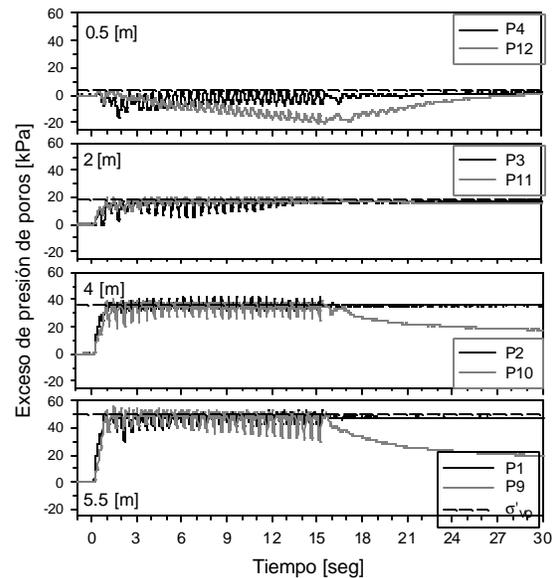


Fig.4: Registro de exceso de presión de poros

este caso la tendencia fue mucho más marcada, alcanzando valores de hasta -20 kPa al final de la excitación. La disminución de presión lateral en el costado aguas abajo del pilote, y las grandes deformaciones de corte en el suelo alrededor del pilote en estado no drenado y con una marcada respuesta dilatante deben haber sido los causantes de este fenómeno. A mayores profundidades, los registros de presión de poros no exhiben tal dramática respuesta. El desarrollo de excesos de presión negativos cerca del pilote generó un mayor gradiente hidráulico vertical en este sector, lo que creó una disipación de presión mucho más rápida que a una mayor distancia del pilote o en el campo libre.

Los perfiles del corrimiento lateral del suelo en el campo libre se obtuvieron interpolando los valores medidos con los LVDTs ubicados en los anillos laminares (Fig.5). Tan pronto el estrato de arena se licuó al comienzo de la excitación basal, el terreno comenzó a moverse lateralmente aguas abajo, alcanzando un desplazamiento máximo al final de la excitación de 140 cm. Los perfiles de deformación del pilote, sin incluir la componente dinámica, fueron determinados en primera aproximación mediante doble integración de los perfiles interpolados de los momentos de flexión a lo largo de la altura, de acuerdo a la ecuación:

$$y_p = \iint \frac{M(h)}{EI} dh \quad [1]$$

donde y_p es la deformación lateral del pilote, EI es la rigidez de flexión del pilote, y h es la altura medida desde la base de la capa licuable. Sin embargo, el desplazamiento lateral en la cabeza del pilote obtenido de esta manera distó bastante del medido con los LVDTs L5 y L6, debido a que el estrato de arena cementada no fue capaz de proporcionar una rigidez angular infinita. Por lo tanto, en una segunda iteración se estimó la rigidez angular dividiendo el momento de flexión medido en la base de la capa licuable por la rotación del pilote necesaria para que el desplazamiento de la cabeza del pilote obtenido mediante la ecuación [1] más el desplazamiento debido a la rotación coincida con el desplazamiento medido con los LVDTs. Se determinó que un valor constante de 8000 kN-m representa muy bien la rigidez angular del estrato cementado (González et al., 2004). Finalmente, incluyendo la deformación por curvatura y la rotación en la base, se determinaron los perfiles de deformación del pilote (Fig.5), los cuales aumentan monótonicamente durante la excitación alcanzando un desplazamiento máximo de 65 cm al final de la excitación.

Como se mencionó anteriormente, se colocó arena de color en el modelo a distintas profundidades para observar el patrón de desplazamiento del suelo licuado alrededor del pilote. La Fig. 6 muestra una fotografía de las condiciones del suelo a un metro de profundidad tomada después del ensayo. La flecha indica la dirección del corrimiento lateral. Se observa claramente que existe una gran área de influencia debido a la presencia del pilote, con esta influencia alcanzando una distancia de varios diámetros a ambos lados del pilote.

Perfiles de momentos de flexión a lo largo del pilote se presentan en la Fig.7 para este modelo 1x1-v saturado con fluido viscoso, después de filtrar la componente dinámica. El pilote alcanzó un momento de flexión máximo de 360 kN-m en la base de la capa licuada al final de la excitación, que debe contrastarse con el modelo 1x1-w saturado con agua (que no se presenta en detalle en este artículo), en que el pilote retrocedió durante la excitación alcanzando un valor mucho menor (120 kN-m) del momento de flexión máximo.

De manera de seguir investigando la interacción entre el pilote y el suelo licuado durante el corrimiento lateral del suelo, se estimó la resistencia lateral del suelo en el pilote (p), usando la simple teoría de la viga de corte de acuerdo con la ecuación [2], donde z es la profundidad.

$$p = \frac{\partial^2}{\partial z^2} M(z) \quad [2]$$

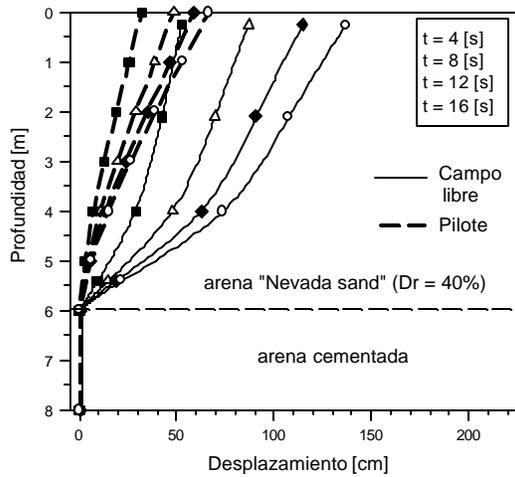


Fig.5: Perfiles de desplazamiento lateral del campo libre y del pilote

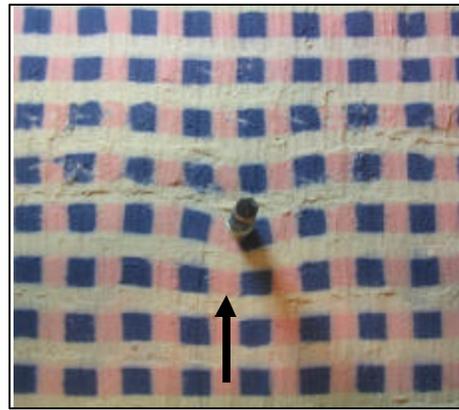


Fig.6: Desplazamiento de arena licuada alrededor del pilote

El pilote estaba instrumentado con seis pares de strain gauges a lo largo de su altura, como se puede observar en la Fig.2. Los valores discretos de momentos de flexión a lo largo del pilote fueron interpolados usando una técnica de interpolación cúbica (spline), que además es quizás la más simple de las interpolaciones que pueden ser doblemente diferenciadas (Wilson, 1998). Sin embargo, ya que la curva interpolada pasa por todos los puntos, la interpolación es afectada por las altas frecuencias (componente dinámica) en su diferenciación. Por lo tanto, la componente dinámica de los registros de momento de curvatura fue filtrada antes de obtener los perfiles de momento de flexión. Finalmente, los perfiles de resistencia lateral (p) fueron obtenidos por doble diferenciación de los perfiles interpolados de momento de flexión con respecto a la profundidad.

La Fig.8 muestra perfiles de resistencia lateral del suelo (p) en distintos instantes durante la excitación dinámica. Se observa que la resistencia lateral varía entre 5 y 20 kN/m entre los 2 y 6 metros de profundidad. Sin embargo, cerca de la superficie, sobre todo a un metro de profundidad, la resistencia lateral aumenta considerablemente durante la excitación dinámica, alcanzando valores de hasta 50 kN/m. Seguramente la disminución de presión de poros cerca

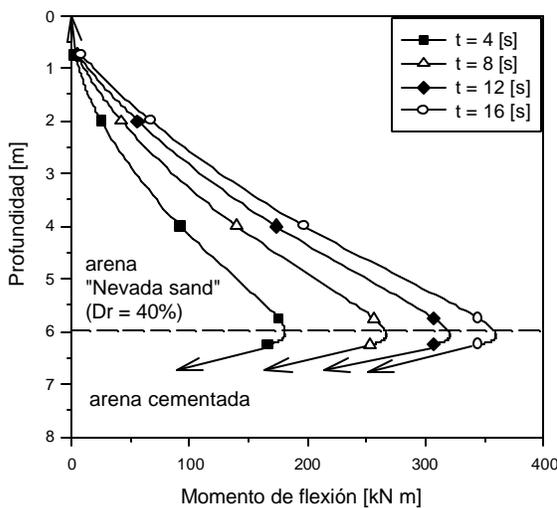


Fig. 7 Perfiles de momentos de flexión

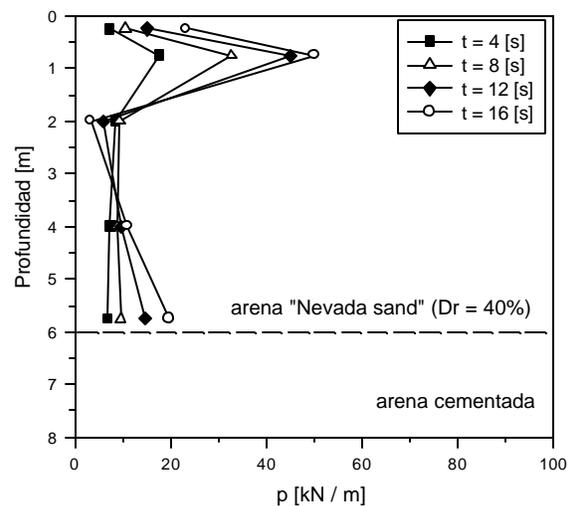


Fig. 8 Perfiles de resistencia lateral del suelo

de la superficie se tradujo en un aumento de resistencia del suelo licuado alrededor del pilote, lo que hizo que el suelo fuera capaz de mantener una gran fuerza sobre el pilote, explicando así la gran deformación y momento de flexión medidos en la fundación. Esto es consistente con la respuesta medida en el modelo 1x1-w, saturado con agua (González et al., 2004), en que no hubo presiones de poros negativas y en que la deformación y momento de flexión medidos en la fundación fueron mucho menores. Todo esto apunta a un muy importante efecto de la permeabilidad del suelo licuado sobre la respuesta del pilote al corrimiento lateral, dependiendo de si el efecto dilatante de la carga sísmica sobre el suelo, así como la disminución de la presión normal lateral del suelo sobre el pilote aguas abajo, alcanzan a ser contrarrestados a tiempo por el agua fluyendo de otras zonas del suelo para evitar el desarrollo de fuertes presiones de poro negativas.

4. CONCLUSIONES

El corrimiento lateral del suelo inducido por licuación continúa siendo una importante causa de daño sísmico a las fundaciones profundas. Actualmente existe una gran incertidumbre asociada con la máxima presión y fuerzas laterales aplicadas por el suelo licuado, lo que se traduce en una gran incertidumbre en la estimación de los máximos momentos de flexión y desplazamientos en el pilote.

Este artículo presenta resultados experimentales y análisis de uno de los ensayos llevados a cabo en la centrifuga geotécnica de RPI para investigar el efecto de la permeabilidad del suelo en la respuesta de los pilotes de fundación. Las conclusiones más relevantes son:

- En el modelo saturado con líquido viscoso, el pilote no retrocede durante la excitación, y los momentos de flexión y desplazamiento del pilote son mucho más grandes que los observados en el modelo saturado con agua.
- La disminución de la presión lateral en el costado aguas abajo del pilote, y las grandes deformaciones de corte sísmicas en el suelo alrededor del pilote en estado no drenado y con una marcada respuesta dilatante, serían al parecer responsables por el desarrollo de los excesos de presión de poros negativos medidos cerca del pilote en el modelo saturado con líquido viscoso, sobre todo a poca profundidad.
- Esta disminución de presión de poros cerca del pilote en el modelo saturado con líquido viscoso se tradujo en un enorme aumento de resistencia del suelo licuado alrededor del pilote, lo que hizo que el suelo fuera capaz de mantener una gran fuerza sobre el pilote. Esta gran fuerza lateral sostenida por la arena licuada superficial sobre la cabeza del pilote hasta el final de la excitación, en el caso del modelo saturado con líquido viscoso, explica porque tanto los momentos de flexión como la deformación del pilote fueron mucho mayores que en el caso del modelo saturado con agua.
- El uso de arena de color fue muy útil para visualizar la gran área de influencia alrededor del pilote para el caso del modelo saturado con líquido viscoso, lo que también es consistente con el aumento de la fuerza sobre la fundación en este caso.
- En conclusión, la permeabilidad de la arena licuada es un factor extremadamente importante y poco comprendido sobre la respuesta de fundaciones profundas al corrimiento lateral del terreno. El fenómeno correspondiente es complejo, incluyendo la tendencia dilatante del suelo al corte, la disminución de la presión lateral sobre el lado de aguas abajo del pilote, y el tiempo que necesita el agua para fluir desde otras zonas de la masa del suelo a tiempo para disipar las correspondientes presiones de poro negativas durante la excitación sísmica. Este estudio y discusión del modelo 1x1-v presentado aquí, así como las comparaciones mencionadas con el modelo 1x1-w y otros modelos discutidos por González et al. (2004), sugieren que los momentos de flexión y desplazamientos de los pilotes de fundación en una arena limosa en el terreno durante un terremoto podrían ser mucho mayores que en una arena limpia.

REFERENCIAS

- Abdoun, T., Dobry, R., O'Rourke, T. D., and Goh, S. H., (2003). "Pile response to lateral spreads: centrifuge modeling", *Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 10, pp. 869-878.
- Berrill, J. B., Christensen, S. A., Keenan, R. J., Okada, W., and Pettinga, J. K., (1997). "Lateral-spreading loads on a piled bridge foundation", *Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures*, (Seco E Pinto, Editor), Balkema, Rotterdam, pp. 173-183.
- De Alba, P., and Ballesterio, T. P., (2004). "Residual strength after liquefaction: a rheological approach", *Proceedings: 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 513-520.
- Dobry, R., and Abdoun, T., (2001). "Recent studies on seismic centrifuge modeling of liquefaction and its effect on deep foundation", *State-of-the-Art Paper, Proc. of Fourth Intl. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (S. Prakash, ed.), Paper SOAP 3, San Diego, CA, March 26-31, Vol. 2, 30 pages.
- Dobry, R., Abdoun, T., O'Rourke, T. D., and Goh, S. H., (2003). "Single piles in lateral spreads: field bending moment evaluation", *Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 10, pp. 879-889.
- Dungca, J. R., Kuwano, J., Saruwatari, T., Izawa, J., Suzuki, H., and Tokimatsu, K., (2004). "Shaking table tests on the lateral response of a pile buried in liquefied sand", *Proceedings: 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 471-477.
- González, L., Abdoun, T., and Dobry, R., (2004). "Effect of soil permeability on centrifuge modeling of pile response to lateral spreading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE; (en preparación).
- Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., and Emoto, K., (1986). "Study on liquefaction induced permanent ground displacements", *Research Rept., Assn. For Development of Earthquake Prediction*, Japan, November, 87 pages.
- Higuchi, H., and Matsuda, T., (2002). "Effects of liquefaction-induced lateral flow of ground against a pile foundation", *Proc. Intl. Conf. of Physical Modeling in Geotechnics*, St. John's Canada, Balkema, pp.465-470.
- Hwang, J. I., Kim, C. Y., Chung, C. K., and Kim, M. M., (2004). "Behavior of a single pile subjected to flow of liquefied soil of an infinite slope", *Proceedings: 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 573-580.
- Mizuno, H., (1987). "Pile damage during earthquakes in Japan (1923-1983)", *Proc. Session on Dynamic Response of Pile Foundations*, T. Nogami (Ed.), ASCE, Atlantic City, April 27, pp. 53-77.
- O'Rourke, T. D., and Hamada, M. (eds.), (1992). "Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes, Vol. 2: United States Case Studies", *National Center for Earthquake Engineering Research, SUNY-Buffalo, NY* (Tech. Rept. NCEER-92-0002).
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., (1974). "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," *6th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, TX.
- Tokimatsu, K., (1999). "Performance of pile foundations in laterally spreading soils", *Proc. Second Intl. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering* (P. Seco e Pinto, ed.), Lisbon, Portugal, Vol. 3, pp. 957-964.
- Whitman, R. V., and Arulanandan, K., (1985). "Centrifuge model testing with dynamic and cyclic loads", *Proc: Advances in the Art of Testing Soil under Cyclic Conditions*, pp. 255-285.
- Wilson, D. W., (1998). "Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay", *Ph.D. Thesis, University of California at Davis, Davis, CA, USA*.
- Yokoyama, K., Tamura, K., and Matsuo, O., (1997). "Design methods of bridge foundations against soil liquefaction and liquefaction-induced ground flow", *2nd Italy-Japan Workshop on Seismic Design and Retrofit of Bridges Rome, Italy*, pp. 109-131.
- Zeghal, M., Dobry, R., Abdoun, T., Zimmie, T. F., and Elgamal, A.-W. M., (2002). "NEES earthquake simulation and networking capabilities at RPI centrifuge", *Proc.7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 7NCEE, Boston, MA, July 21-25*.