



**ESTADO DEL ARTE
DISEÑO DE COLUMNAS DE GRAVA
PARA MITIGACIÓN DE LICUACIÓN**

**INFORME TÉCNICO
INF-VS-01-RF**

**Aldo D. Guzmán G.
Nicolás Tapia V. / Mario Colil B.**

Julio 2020

CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Métodos de ejecución de columnas de grava	3
3. Preperforación para ejecutar columnas de grava	4
4. Diferencia de resultados en la compactación de arenas entre los Vibradores Profundos y los Martillos Vibradores en cabeza	5
5. Últimas investigaciones y recomendaciones sobre los métodos de diseño para mitigación de licuación con columnas de grava.	5
6. Diseño de mejoramiento con columnas de grava para mitigar licuación en base a las últimas investigaciones	10
7. Verificación del tratamiento de mitigación de licuación con columnas de grava	11
8. Conclusiones.....	11
9. Referencias.....	13

1. Introducción

Las columnas de grava constituyen unos de los métodos más usados para mitigar la licuación sísmica. Generalmente se habla de “mitigar” y no de “eliminar” la licuación. Este concepto viene del idioma inglés (“liquefaction mitigation”). Con ello se deja claro que los efectos de la licuación generalmente no se eliminan completamente con columnas de grava, pudiendo limitarse el tratamiento a reducir los efectos de la licuación hasta un nivel aceptable para el proyecto.

En este informe se revisarán los métodos constructivos habituales en la región, con las características más destacadas de cada uno, y se presentan las conclusiones de investigaciones recientes, las cuales modifican en forma importante las hipótesis de diseño del tratamiento mediante columnas de grava para mitigar la licuación.

2. Métodos de ejecución de columnas de grava

Los métodos presentes actualmente en el mercado del Pacífico sudamericano para la ejecución de columnas de grava son:

- i. **Uso de vibradores profundos (Deep Vibrators).** El vibrador profundo es un elemento cilíndrico que cuenta con un motor eléctrico o hidráulico que rota una masa excéntrica en su extremo inferior. Como el motor tiene eje vertical, la rotación de la masa excéntrica genera una vibración horizontal. Estos vibradores se usan mayormente en dos variantes:
 - a) **Top Feed** (alimentación de la grava en superficie) o comúnmente denominado también Vía Húmeda (dado que en este método se barre normalmente con agua). En este método, el vibrador profundo va unido a tubos de extensión y suspendido de una grúa. El vibrador penetra en el terreno por su peso propio, vibración y barrido con agua a gran caudal. Una vez alcanzado el fondo planificado de la columna, se inicia el aporte de grava en superficie. El vibrador se extrae lentamente, realizando movimientos ascendentes-descendentes, para dejar pasar la grava por el espacio anular y luego compactarla contra el terreno.
 - b) **Bottom Feed** (alimentación de la grava en el fondo) o Vía Seca (dado que en este método se utiliza aire comprimido y casi nada de agua). Este método también utiliza el vibrador profundo montado sobre tubos metálicos de extensión, pero adosado a un tubo de conducción de la grava, que transporta la misma desde una tolva superior hasta la punta inferior del vibrador. En este método, el conjunto se baja desplazando el terreno, sólo acompañado por aire comprimido, pero básicamente sin extracción de finos o suelo. Es importante destacar que el equipo cuenta con una compuerta superior, de forma que durante el aporte de la grava se presuriza el interior del tubo con aire comprimido, para evitar el sifonaje de la arena cuando se ejecutan columnas de grava en arena o limo bajo agua. Esto es sumamente

importante para el tratamiento en terrenos licuables, ya que el método de ejecución controla el relajamiento del suelo alrededor de la columna y el ingreso de finos desde el terreno circundante hacia el interior de la columna, reduciendo su futura permeabilidad.

- ii. **Uso de vibradores en cabeza o martillos vibratorios (“top vibrators”)**: en este caso, el método consiste en hincar un tubo metálico con una punta perdida o recuperable, de tal forma que la hinca se realiza por desplazamiento total, sin extracción de suelo. El tubo metálico está dotado de una tolva superior donde se vierte la grava una vez alcanzada la cota de punta planificada o el rechazo, lo que antes ocurra. Esta metodología no es la más utilizada ni tecnológicamente más desarrollada en el mercado internacional, por las razones que expondremos más adelante.
- iii. **Columnas (Pilas) de grava o agregado compactado**: este sistema consiste en perforar un pozo sin revestimiento (o sea, sin encamisado temporal) y una vez alcanzada la cota de perforación máxima, se vierte grava en capas compactándola con un martillo hidráulico y una masa de una forma especial. El sistema logra buenas compacidades de la grava, pero requiere que la perforación sea estable sin encamisar, lo cual normalmente no es posible en terrenos licuables (arenas y limos bajo el nivel freático). El sistema está protegido por patentes propiedad de otra empresa (Pilotes Terratest no ejecuta este método). La marca “Rammed Aggregated Pier”™ (RAP) es propiedad de otra empresa. Sin embargo, el término “Aggregated Pier” es de uso libre e incluye a columnas de grava ejecutadas con una metodología similar al RAP.

3. Preperforación para ejecutar columnas de grava

Dadas las magnitudes de los sismos probables en la costa del Pacífico sudamericano, es frecuente encontrar suelos susceptibles de licuar con valores de SPT o CPT relativamente altos en comparación con lo que normalmente se considera un terreno poco compacto o “blando”. Los métodos constructivos indicados anteriormente, en mayor o menor medida, pueden requerir una perforación previa para atravesar zonas o lentes de mayor compacidad y llegar a formar las columnas de grava en estratos profundos aún susceptibles de licuar. En estos casos, es importante perforar sin extraer totalmente el suelo de la perforación, dejando la mayor parte del terreno en la perforación, aunque con mucha menor compacidad. El método ideal para ese fin es el CFA (hélice o barrena continua), retirando la hélice con rotación inversa para extraer la menor cantidad de suelo posible. En ningún caso se recomienda perforar con un sistema de rotación con barra Kelly telescópica, extrayendo la herramienta y desconfinando el pozo completamente, por las razones expuestas en el punto (2.iii.) anterior.

4. Diferencia de resultados en la compactación de arenas entre los Vibradores Profundos y los Martillos Vibradores en cabeza

Existen investigaciones sobre el alcance de la compactación lograda por los vibradores profundos en arena alrededor de una columna de grava, en comparación con el que logran los martillos vibradores.

Las diferencias importantes están dadas en que el vibrador profundo genera la vibración en sentido horizontal formando un cuerpo de generatriz cónica, generando vibraciones en todas las direcciones de un plano horizontal, mientras que el martillo vibrador (en cabeza) lo hace sólo en la dirección vertical. Por otro lado, el vibrador profundo descarga la energía a la cota del tratamiento, en profundidad, mientras el martillo vibrador está en superficie, perdiendo parte de la energía cuando los tratamientos son profundos.

Ha sido posible verificar mediante análisis numéricos que el radio de compactación logrado por los vibradores profundos en arenas limpias es mayor que en caso de usar un martillo vibrador en cabeza.

El estudio realizado por Arnold et al (2009) [1] demuestra con un modelo computacional que el vibrador profundo consigue un radio de mejora muy superior al martillo vibrador para la misma frecuencia, amplitud y duración del tratamiento.

Esto explica por qué en todo el mundo se usa mucho más el vibrador profundo en la mejora de suelos, desde que se inventó en la década de 1930.

Esta característica de los vibradores profundos también los hace preferibles a los martillos vibradores para los tratamientos de mitigación de la licuación, ya que uno de los efectos más importantes para reducir el potencial de licuación es densificar al máximo posible el suelo entre columnas, como veremos más adelante.

5. Últimas investigaciones y recomendaciones sobre los métodos de diseño para mitigación de licuación con columnas de grava.

La mitigación de la licuación utilizando columnas de grava se produce por tres (3) efectos que se describen a continuación:

1. **Densificación del suelo.** Se consigue una densificación del suelo circundante a las columnas de grava en suelos arenosos con pocos finos. En general, en suelos con un porcentaje de finos mayor al 12-15% (finos bajo tamiz #200) no se consigue una densificación del suelo circundante con métodos basados en vibración. (Degen [12]).
2. **Rigidización/Refuerzo.** Se considera que las columnas de grava concentran la mayor parte del corte sísmico por su mayor rigidez y por lo tanto reducen el CSR (cyclic stress

ratio) del suelo circundante. Sin embargo, últimas investigaciones han permitido confirmar que las metodologías de cálculo tradicionales basadas en la hipótesis de compatibilidad de deformaciones de corte entre el suelo y las columnas de grava (Fig.1) (Baez and Martin (1993) [2] y Priebe (1998) [3]), sobreestiman este efecto.

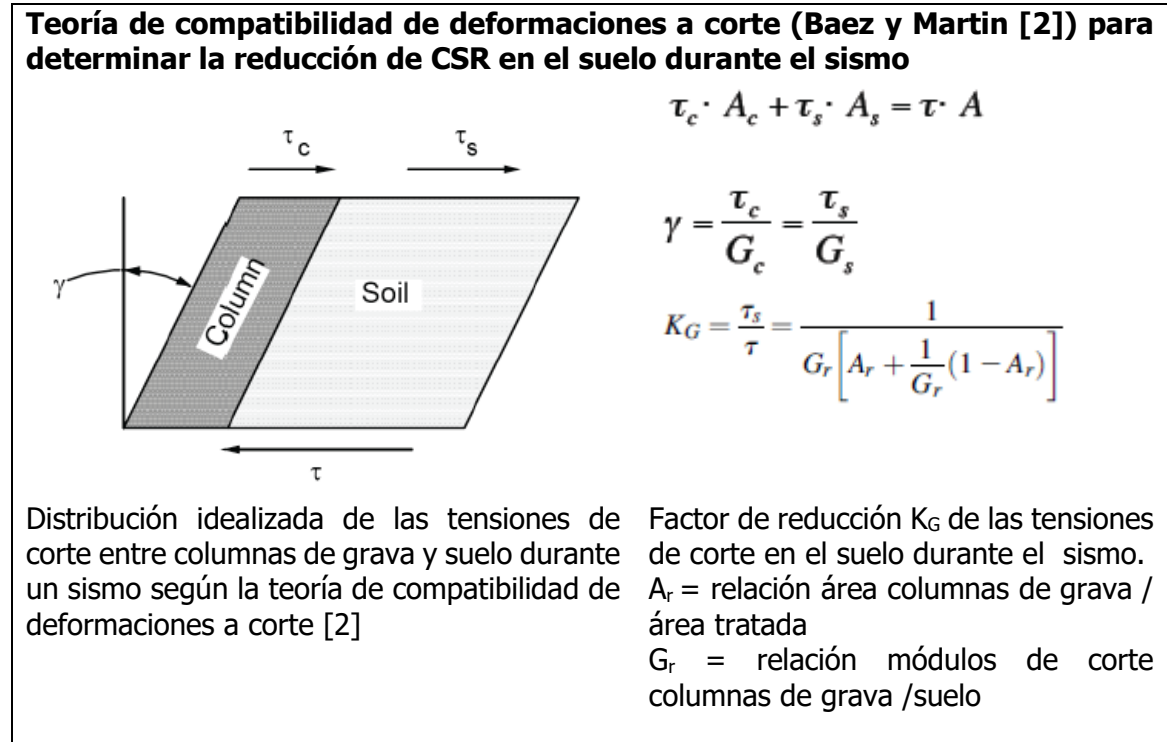


Fig. 1 – Teoría de compatibilidad de deformaciones a corte para calcular reducción de CSR

Varios estudios publicados recientemente han concluido que las columnas de grava se pueden deformar tanto a corte como a flexión durante un evento sísmico (Goughnour and Pestana 1998; Green et al. 2008; Olgun and Martin 2008; Olgun 2010 [14]; Rayamajhi et al. 2014 [4], 2016 [13]). Esto último lleva a que el efecto de rigidización es bastante menor al calculado con las metodologías de Baez y Priebe, como resume Salem [5] en el gráfico de Fig. 2.

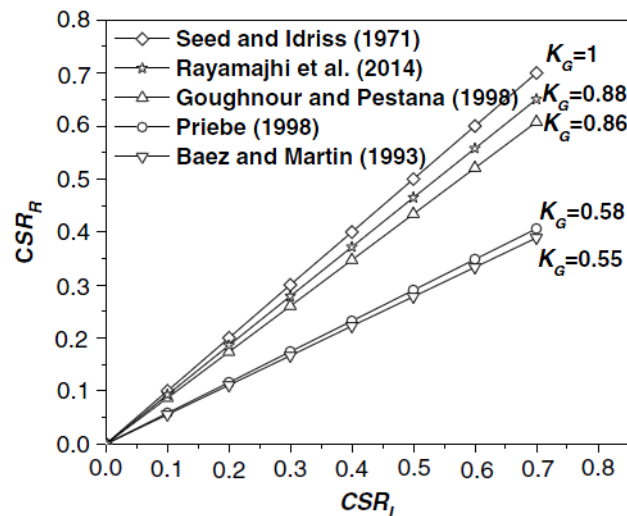


Fig. 2 - Reducción del CSR debido a mejora con columnas de grava (Salem et al. 2017) [5]

Por este motivo, ya existen recomendaciones que sugieren discontinuar el uso de las teorías que se basan en la compatibilidad de deformaciones a corte para diseñar columnas de grava para mitigar la licuación ([6], [9] y [16]), debido a que su utilización da lugar a diseños inseguros (subdimensionados).

3. **Drenaje.** Las columnas de grava, al tener mayor permeabilidad que el suelo natural, actúan como drenes verticales. Este efecto permite disipar el aumento de presiones de poros ocurrido durante un sismo.

En este caso se utiliza el método de cálculo de Onoue [10] basado en el de Seed & Booker (1977) [11]. Para esta metodología de cálculo se necesitan datos del sismo de diseño, como el tiempo de duración del sismo y el número de ciclos de carga equivalente durante un terremoto. Como parámetros del suelo, se necesita conocer la permeabilidad horizontal del estrato potencialmente licuable, número de ciclos necesarios para que inicie la licuación (obtenido de ensayo triaxial cíclico). Sin embargo, el uso de las columnas de grava como drenes para la mitigación de la licuación debe utilizarse con cuidado. Algunas recomendaciones (p.e. [16]) sugieren no considerarlo en el diseño y dejarlo como una seguridad adicional, puesto que el método es muy sensible a la permeabilidad y existe la posibilidad de contaminación de las columnas con finos (efectos ambos de muy difícil comprobación en la práctica).

Otro dato de diseño necesario para el cálculo del tratamiento de columnas de grava es el factor de seguridad frente a licuación requerido. Usualmente se suele adoptar un factor de seguridad igual a 1,00. No obstante, hay que considerar que, con este factor de seguridad, el asentamiento

post-sismo no es nulo. De acuerdo a Ishihara y Yoshimine [7] (1992), la deformación volumétrica (ϵ_v) post-sismo de un suelo cuyo factor de seguridad frente a licuación sea 1,00 está comprendida entre el 0,5 y el 1,5% (Fig. 3).

Dado lo anterior, si bien el tratamiento con columnas de grava mitiga el potencial de licuación, no se puede garantizar una deformación post-sismo acotada con la certeza adecuada cuando se trata de fundar cargas concentradas altas y/o estructuras sensibles a asentamientos, a menos que el tratamiento apunte a evitar el inicio de la licuación (“triggering of liquefaction”)¹ en todo el estrato potencialmente licuable.

En caso de un tratamiento parcial del estrato licuable con columnas de grava, aún existirán asentamientos inducidos en superficies por estratos inferiores, aunque el efecto “costra” del estrato superior mejorado los puede reducir significativamente.

La predicción de los asentamientos esperables en ese caso debe considerar, según investigaciones disponibles con los métodos de cálculo existentes actualmente, que los asentamientos reales se sitúan en un rango de entre 0,5 a 2 veces el asentamiento teórico calculado (ver Cetin [17] y Fig. 4).

Por tal motivo, en caso de estructuras sensibles a los asentamientos podría ser necesario tratar todo el estrato licuable o seleccionar otra solución (p.e., pilotes).

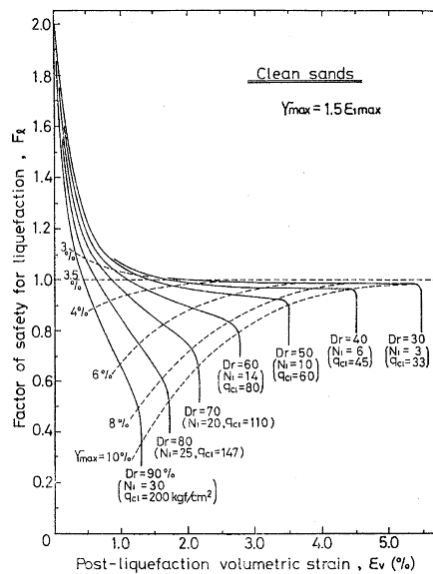


Fig. 10. Chart for determining volumetric strain as functions of factor of safety

Figura 3 - Ábaco para determinar la deformación volumétrica en función del factor de seguridad. Ishihara 1992 [7]

¹ Las recomendaciones neocelandesas recomiendan incluso FS mayor a 1,50 para demostrar serviceabilidad.

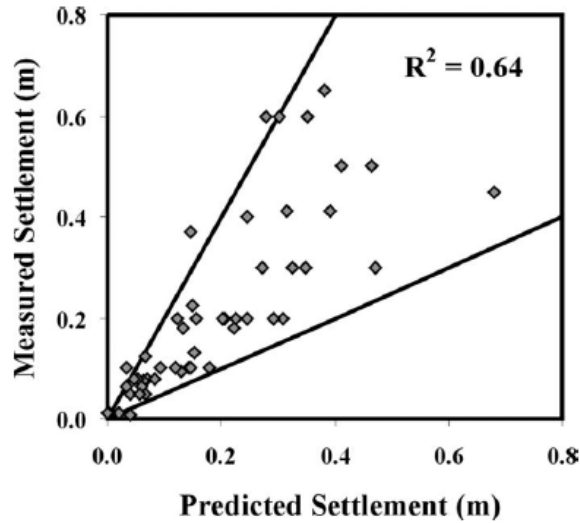


Figura 4 – Relación entre asentamientos previstos (calculados) y asentamientos reales observados (Cetin [17])

También se debe tener en cuenta que el tratamiento de mejora frente a licuación debe considerar un sobrancho para evitar la pérdida de confinamiento lateral de la zona tratada. Se puede diseñar este sobrancho de acuerdo a recomendaciones japonesas [8] (Fig. 5) o según el módulo 5 de la Sociedad Geotécnica de NZ [16], que recomienda un sobrancho algo menor a la recomendación japonesa, con un sobrancho L igual a la mitad del estrato licuable.

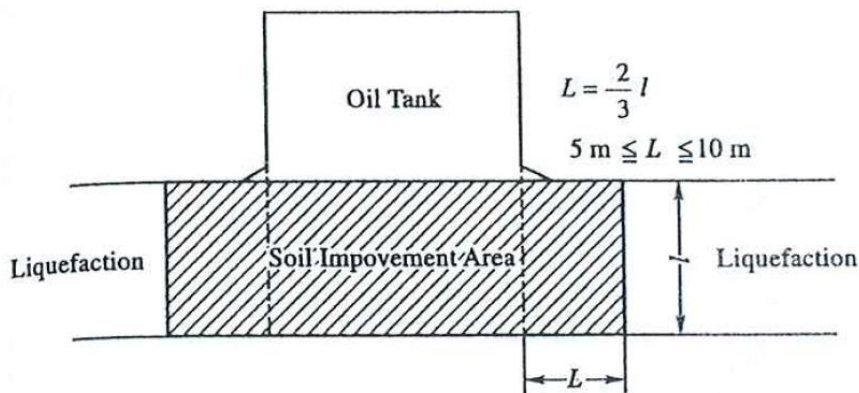


Fig. 5 - Esquema de mejora de suelo frente a licuación. Definición del sobrancho.[8]

6. Diseño de mejoramiento con columnas de grava para mitigar licuación en base a las últimas investigaciones

En base a todo lo explicado en el punto 5., queda claro que el diseño de columnas de grava como mejoramiento destinado a la mitigación de licuación no puede estar basado solamente en el efecto de refuerzo o rigidización, puesto se ha demostrado que dicho efecto tiene una importancia muy inferior (Rayamajhi (2014) [4] y Olgun (2010)[14]) a la considerada en el pasado, dando lugar a un diseño inseguro o subdimensionado.

Por lo tanto, un diseño moderno de mitigación de licuación con columnas de grava debe basarse en:

- a) Obtener una densificación del terreno natural, entre columnas de grava. Cuando esto no sea posible por presencia de un contenido de finos superior a aprox. 15%, que no permita la densificación por vibración, se sugiere utilizar mechas drenantes (“wick drains”) en conjunto con columnas de grava [15] (Fig. 6). En efecto, instalando primero las mechas drenantes y ejecutando luego las columnas de grava, es posible lograr una densificación en arenas limosas, comparando con el caso sin mechas.
- b) Utilizar la posible mejora por rigidización sólo en la medida en que la actual teoría presentada por Rayamajhi et al (2014) [13] propone hacerlo, lo que supone una reducción del CSR muy inferior a la que se utilizaba según las teorías antiguas (Baez, Priebe).
- c) Evaluar si el asentamiento post licuación, con su variabilidad estadística esperable, es aceptable para el tipo de estructura a fundar sobre el mejoramiento,
- d) Tomar en cuenta que todo tratamiento de mejora del terreno para mitigar licuación requiere el sobrecancho que limite la pérdida de confinamiento lateral. Las columnas de grava no se comportan como pilotes!

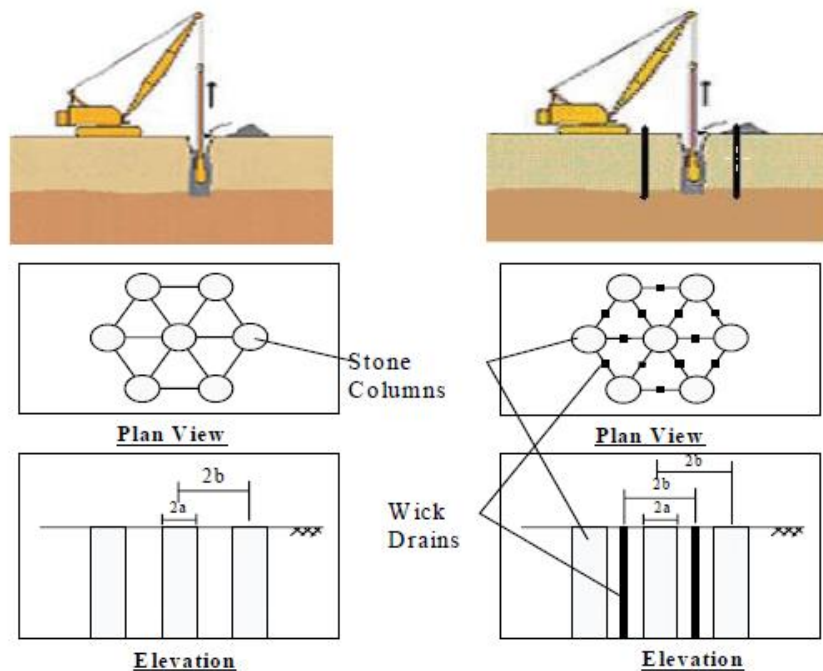


Fig. 6 – Tratamiento combinado de mechas drenantes y posterior aplicación de columnas de grava [15]

7. Verificación del tratamiento de mitigación de licuación con columnas de grava

En base a los principios anteriores, la verificación del tratamiento debe basarse en evaluar la densificación lograda en el terreno natural entre columnas de grava. Esto deberá verificarse realizando ensayos de penetración SPT o mejor CPT entre columnas de grava, tanto antes como después del tratamiento.

La inferencia del éxito o no del tratamiento en base a cualquier tipo de ensayo de carga sobre una columna o grupo de columnas no es válida. La capacidad de carga de una columna o grupo de columnas no permite inferir la seguridad del tratamiento para mitigación de licuación.

8. Conclusiones

Cuando se diseña un mejoramiento de suelos para mitigar la licuación, no debe perderse de vista que en general los métodos de cálculo disponibles apuntan a reducir fuertemente los efectos de dicho fenómeno, pero difícilmente consiguen anularlos por completo, dada la magnitud de los sismos en la costa del Pacífico sudamericano.

Por tal motivo, es importante revisar conservadoramente los métodos de cálculo que están siendo utilizados, debido a que nuevas publicaciones han permitido demostrar que algunos de ellos llevan a un subdimensionado inseguro del tratamiento.

Las últimas investigaciones han concluido que el diseño de la mitigación de licuación debe basarse mucho más en la densificación del terreno entre columnas y en mucha menor medida al efecto de rigidización o refuerzo, contrariamente a lo que se creía en el pasado.

Se recomienda tener en cuenta que la mitigación de la licuación mediante columnas de grava puede llevar a cierto grado de asentamientos post-sismo que deben ser tolerables para la estructura. En caso contrario, deben considerarse otras soluciones.

9. Referencias

- [1] Arnold, M. et al. (eds.), Geotechnics of Soft Soil: Focus on Ground Improvement, 2nd International Workshop on Geotechnics of Soft Soils, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2009)
- [2] Advances in the design of vibro systems for the improvement of liquefaction resistance - Ground Improvement, The Vancouver Geotechnical Society - Baez, Martin (1993)
- [3] Vibro Replacement to prevent earthquake induced liquefaction, Ground Engineering – H.-J. Priebe (1998)
- [4] Numerical Study of Shear Stress Distribution for Discrete Columns in Liquefiable Soils, Rayamajhi et al (2014), Journal Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000970>
- [5] Effects of Densification and Stiffening on Liquefaction Risk of Reinforced Soil by Stone Columns, Salem et al (2017), Journal Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE
<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0001773>
- [6] Commentary on the Selection, Design and Specification of Ground Improvement for Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction – Deep Foundations Institute – Journal Aug. 2013
- [7] Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes - Ishihara and Yoshimine (1992).
- [8] Remedial Measures against Soil Liquefaction – Balkema – The Japanese Geotechnical Society (1998).
- [9] Oregon Department of Transport (DOT Oregon), USA – Geotechnical Design Manual (December 2016), Chapter 11.3
- [10] Diagrams considering well resistance for designing spacing ratio of gravel drains. Soils and Foundations, Japanese Soc. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 28(3), 1988: 160-168. Onoue, A. (1988)
- [11] Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems (Earthquake Eng. Research Center) – Report Nr. EERC 76-10 – Seed, B., Booker, J. (1976)
- [12] Vibratory Ground Improvement, W.S.Degen (citado por Kirsch F. y Kirsch K.: Ground Improvement by Deep Vibratory Methods, CRC Press, Second Edition, 2017)

[13] Dense Granular Columns in Liquefiable Ground. I: Shear Reinforcement and Cyclic Stress Ratio Reduction, Rayamajhi et al (2016), Journal Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE

[14] Seismic Response of Columnar Reinforced Ground, Olgun (2010), 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics

[15] Technical Report MCEER-06-0009 (2006), FHWA, Liquefaction Mitigation in Silty Soils using Dynamic Compaction and Stone Columns.

[16] Module 5: Ground Improvement of soils prone to liquefaction (New Zealand Geotechnical Society) -2017

[17] Probabilistic Model for the Assessment of Cyclically Induced Reconsolidation (Volumetric) Settlements – Cetin et al (2009) – Journal Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE