



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL
TERRENO Y DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS TEÓRICO DE LA
CONSOLIDACIÓN Y DEFORMACIÓN
ALREDEDOR DE COLUMNAS DE GRAVA

Autor

JORGE CASTRO GONZÁLEZ

Director

CÉSAR SAGASETA MILLÁN

Santander, 2008

Conclusiones

Aunque ya se han expuesto a lo largo de la tesis, se resaltan a continuación las principales conclusiones alcanzadas.

- Sobre aspectos generales de las columnas de grava

Un tratamiento con columnas de grava es adecuado en casos de cargas repartidas o cargas puntuales de escasa entidad aplicadas sobre estratos de suelo blando de espesor intermedio (en torno a 10 m). Permiten reducir los asentos totales y diferenciales, la posibilidad de licuefacción, acelerar el proceso de consolidación y mejorar la capacidad portante y la estabilidad frente a deslizamiento. En las últimas obras de columnas de grava realizadas en España, siempre que se dispone de la maquinaria adecuada, se prefiere la construcción por vía seca y con alimentación por fondo.

Para poder estudiar las columnas se necesita obtener un modelo teórico sencillo. Éste suele ser en simetría axial o en deformación plana. Esta transformación no es directa y se debe analizar adecuadamente, teniendo presente cuáles son los principales problemas que se pretenden estudiar para establecer los criterios de equivalencia. Cuando el principal problema a estudiar es la consolidación, se proponen en esta tesis nuevas expresiones para las dimensiones de la “celda unidad”. Sin embargo, para el caso habitual de distribución del tratamiento en una malla triangular, la diferencia entre la expresión propuesta y la utilizada habitualmente es poco significativa.

En el cálculo de la estabilidad de las columnas es importante incluir la contribución de la carga vertical que actúa sobre el terreno que las rodea, especialmente cuando se trata de cargas repartidas. También se debe tener en cuenta que los coeficientes de seguridad elegidos pueden ser diferentes en cada caso.

En la Guía de Cimentaciones (Ministerio de Fomento, 2002) se analiza la estabilidad sólo en el caso de columnas portantes, y no se indica nada sobre el caso de

carga extensa, pero es evidente que debe considerarse el efecto favorable de la carga sobre el terreno que rodea cada columna.

En todo caso, el análisis habitual es considerar el reparto de tensiones entre la columna y el suelo para la situación pésima, que es la final, y para el terreno la resistencia sin drenaje inicial, que es la mínima. Estas dos consideraciones son incompatibles, pero del lado de la seguridad.

La consolidación radial alrededor de drenes verticales constituye la base del estudio de la consolidación alrededor de las columnas de grava. Su solución analítica se basa en despreciar las deformaciones radiales y trabajar con una presión intersticial media a lo largo de todo el radio. En el caso de columnas de grava, su mayor capacidad portante provoca que soporten una parte importante de la carga aplicada y el proceso de consolidación sea diferente.

- Sobre el reparto final de la carga vertical entre el suelo y la columna

La reducción del asiento lograda con el tratamiento está directamente relacionada con el reparto de tensiones entre el suelo y la columna para la situación final. La solución elástica confinada (Han y Ye, 2001) es sencilla de obtener pero constituye una aproximación muy grosera del problema que conduce a valores excesivamente altos del factor de concentración de tensiones.

La solución elástica no confinada (Balaam y Booker, 1981) permite obtener un comportamiento más ajustado a la realidad al introducir las deformaciones radiales del contacto columna-suelo. Es rigurosa en su desarrollo teórico pero aún sigue siendo algo optimista, ya que las columnas de grava suelen alcanzar el estado plástico incluso para valores no muy elevados de la carga aplicada.

La solución semi-empírica de Priebe (1976, 1995) permite obtener valores más realistas al introducir la plastificación de la columna. Su desarrollo teórico contiene diversas hipótesis simplificadoras, no hace intervenir la dilatación de la columna e introduce los efectos de otros parámetros como la rigidez de la columna con correcciones realizadas “a posteriori”.

Aunque el objetivo principal del modelo analítico desarrollado en esta tesis es el estudio de la consolidación, éste también permite obtener las situaciones inicial y final. La reducción del asiento final obtenida está en el mismo rango que la solución de Priebe (1995) pero teniendo en cuenta la dilatación de la columna y sin necesidad de realizar hipótesis empíricas o correcciones “a posteriori” en el modelo. Los valores del factor de concentración de tensiones están en el rango de los medidos experimentalmente (3-10) y muestran la influencia de la deformación radial y de la plastificación de la columna.

- Sobre el análisis de la consolidación

La forma más sencilla de introducir el reparto de tensiones entre el suelo y la columna en el estudio de la consolidación es suponer que el valor de la tensión sobre el suelo es constante en el tiempo pero diferente a la carga aplicada. Se suele emplear el valor final de la tensión sobre el suelo. Este análisis permite considerar la reducción de asiento lograda pero los tiempos de consolidación no varían.

Más realista es el análisis propuesto por Han y Ye (2001) que tiene en cuenta la variación de la tensión vertical sobre el suelo con el tiempo. Este análisis permite considerar la disminución de los tiempos de consolidación a través de un coeficiente de consolidación modificado. Sin embargo, consideran una disminución con el tiempo de la tensión vertical sobre el suelo excesiva, ya que se basan en la solución elástica confinada.

El modelo teórico desarrollado en esta tesis mejora las soluciones previas porque incluye la interacción radial y vertical entre el suelo y la columna para un comportamiento elástico no confinado y plástico de la columna. De forma similar a Han y Ye (2001), la reducción de los tiempos de consolidación se tiene en cuenta a través de coeficientes de consolidación equivalentes. No obstante, estos coeficientes son más realistas al incluir las deformaciones radiales y plásticas de la columna. De la comparación con métodos numéricos se obtiene que la solución propuesta en esta tesis reproduce más adecuadamente el proceso. La hipótesis básica de este modelo es el empleo de una presión intersticial media a lo largo del radio, de la misma forma que se realiza en el resto de soluciones para el drenaje radial.

El algoritmo del modelo teórico es utilizable directamente en una hoja de cálculo para el diseño de casos reales (Apéndice A).

- Sobre la instrumentación de obras reales

Durante la instalación de las columnas de grava, especialmente por vía seca, se afecta al suelo circundante. Se generan excesos de presión intersticial que alcanzan en cada punto su máximo valor cuando el vibrador se sitúa a su misma profundidad. Estos picos de presión intersticial se ajustan a una ley logarítmica con la distancia a la columna, tal y como cabe deducir de la teoría de expansión de cavidades. Los picos son mayores cuanto mayor es la profundidad y cuantas más columnas se han instalado previamente en sus alrededores. La disipación de estos excesos de presión intersticial fue muy rápida en el caso instrumentado, no existiendo presiones intersticiales remanentes en el momento de elevación del terraplén.

La instalación de las columnas también produce un remoldeo del suelo circundante que puede provocar que disminuya su resistencia al corte si se trata de una arcilla susceptible, y genera unos empujes laterales que pueden incrementar la tensión horizontal. Ello podría explicar los mayores incrementos en la presión intersticial cuando se han instalado más columnas alrededor.

Para realizar una correcta caracterización de suelos blandos es necesario realizar ensayos “in situ” como piezoconos con ensayos de disipación en los estratos más impermeables. Se debe tener especial cuidado en la localización e interpretación de estos ensayos de disipación. En este tipo de suelos, los ensayos de laboratorio pueden realizarse sobre las partes más arcillosas de la muestra, y proporcionar así valores conservadores del módulo de deformación y del coeficiente de consolidación.

Además de la caracterización del terreno, es interesante un control e identificación de la grava empleada en las columnas, en especial, de su rigidez, densidad, ángulo de rozamiento y de dilatación.

La instrumentación de casos reales debe adecuarse a los aspectos constructivos, económicos y organizativos de las obras. Concretamente, es necesaria una buena coordinación de la toma de lecturas con los trabajos de elevación del terraplén y la nivelación topográfica de la zona instrumentada.

No se ha podido comparar el proceso de consolidación del modelo teórico con el medido en campo, ya que en ninguno de los dos casos instrumentados fue posible medir la disipación de presiones intersticiales debido a la rapidez del proceso de consolidación. Este hecho es atribuible a la moderada permeabilidad del terreno, a que ha sido mejorado con columnas y a un proceso de aplicación de la carga diferido en el tiempo.

Los valores del factor de concentración de tensiones obtenidos a partir de las células de presión total se encuentran generalmente dentro de los rangos habituales medidos en obras reales (2-6), con la dispersión habitual de las lecturas. Los inclinómetros empleados en los macizos de Arbuio han permitido detectar situaciones de bajo coeficiente de seguridad, próximo a 1 para desplazamientos horizontales en torno a 0.1 mm/día con altura del terraplén constante.

Los modelos numéricos mediante elementos finitos han demostrado ser una herramienta eficaz en la predicción y control de las obras instrumentadas. Los valores del coeficiente de seguridad obtenidos con métodos de equilibrio límite son ligeramente superiores a los obtenidos mediante elementos finitos, siendo ambos métodos de cota superior.

Futuras líneas de investigación

Esta tesis doctoral pretende ser un paso más en el estudio de las columnas de grava y facilitar los múltiples pasos siguientes que son necesarios para avanzar en el conocimiento de su comportamiento. Con la perspectiva de lo estudiado en esta tesis, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación en los diversos campos.

- Soluciones analíticas

Todas las soluciones presentadas para estudiar la consolidación radial alrededor de drenes verticales o columnas de grava se basan en el empleo de una presión intersticial media a lo largo del radio. Aunque su importancia práctica es menor, ya que el error se localiza en el inicio de la consolidación, sería conveniente lograr una solución que satisfaga completamente la condición inicial. Esta solución requiere de un estudio doblemente acoplado del problema. El empleo de la poroelasticidad, con una rigidez no infinita del agua, podría facilitar su resolución.

El modelo analítico desarrollado en la tesis puede completarse para poder tener en cuenta una zona remoldeada alrededor de la columna, una permeabilidad finita de la columna y una aplicación de la carga no instantánea. Este modelo tiene que seguir contrastándose con diferentes resultados numéricos, de laboratorio y de campo para comprobar qué aspectos del comportamiento de las columnas reproduce adecuadamente y cuáles no.

- Análisis numéricos

Son abundantes los avances que se están haciendo en este campo: modelos de comportamiento más complejos, comparación de modelos en deformación plana y axi-simétricos, análisis tridimensionales, etc. Sería conveniente resumir todos ellos y extraer las conclusiones oportunas que puedan facilitar la realización de sencillos cálculos numéricos en el diseño de un tratamiento con columnas.

- Instrumentación en campo

Los resultados de la instrumentación en campo realizados en esta tesis no han sido completamente satisfactorios porque no han permitido estudiar el proceso de consolidación. La instrumentación de un terraplén construido sobre un suelo de permeabilidad muy baja y mejorado con columnas es una de las investigaciones que más datos puede aportar. Una correcta caracterización del terreno debe basarse en ensayos CPTU en la zona exacta de colocación de la instrumentación y ensayos de disipación a la profundidad exacta de colocación de los piezómetros para poder obtener valores fiables del coeficiente de consolidación. El empleo de líneas continuas de asiento permite la obtención del perfil de asientos y los extensómetros permiten obtener la compresión de los diferentes estratos. Siempre es deseable que una de las varillas del extensómetro alcance una profundidad elevada para tener en cuenta el asiento producido por debajo de las columnas. A pesar de que la realización de un terraplén experimental tenga un coste elevado, presenta múltiples ventajas frente a un terraplén de una obra real, que siempre está sometido a sus necesidades y exigencias.

El estudio de los efectos de la instalación de las columnas es un campo que está siendo investigado. El aumento de las tensiones horizontales en el suelo circundante a las columnas y su consiguiente rigidización, requiere más medidas en campo.

- Modificaciones del método de mejora

Existen múltiples variantes en desarrollo de las columnas de grava, como pueden ser las columnas de módulo controlado, en las que a la grava se añade una lechada. Otra de las modificaciones posibles es rodear la columna de grava mediante un geotextil para incrementar su confinamiento lateral. Este método presenta inconvenientes en su ejecución, pero su estudio y desarrollo puede dar lugar a resultados satisfactorios.

Conclusions

Although they have been already mentioned throughout the thesis, some concluding remarks are highlighted below.

- About stone columns

Stone columns are useful in cases of distributed loads or relatively light structures on soft soil layers of middle thickness (around 10 m). They reduce total and differential settlements, liquefaction potential and consolidation time. Furthermore, they increase bearing capacity and slide stability. In the latest stone column treatments made in Spain, if the equipment is available, columns are installed using the dry-way bottom-feed method.

A theoretical study of stone columns needs a simplified model, which is usually in plane strain or axial symmetry. The conversion into such a model is not straightforward and has to be analysed, considering the different problems that will be studied. When the major problem is the settlement rate, new equivalent diameters are proposed in this thesis for the “unit cell”. However, for a triangular pattern, which is the most common, the difference between the proposed diameter and the previous one is not significant.

The analysis of stone column stability should include the contribution of the vertical load on the surrounding soil, specially under distributed loads. The Spanish foundation guide for road works (Ministerio de Fomento, 2002) studies the stability of columns only when they are used as bearing elements, and does not mention the case of distributed loads, but it is evident that the positive effect of the load on the surrounding soil should be included.

In any case, the usual analysis considers the worst situation for the soil/column stress distribution, which occurs at the end of consolidation, together with the minimum

undrained shear strength for the soil, at the initial state. These two hypotheses are not compatible, but it is on the safe side.

Radial consolidation around vertical drains is the reference to consolidation around stone columns. The analytical solution for this case is made in terms of the average pore pressure along the radius and neglects radial deformations. However, stone columns have higher stiffness than drains and carry an important part of the applied load.

- About final stress distribution between soil and column

The settlement reduction achieved with the treatment is directly related to the final soil/column stress distribution. The elastic confined solution (Han and Ye, 2001) is easy to develop but it is a crude first approach, leading to abnormally high stress concentration ratios.

The elastic solution (Balaam and Booker, 1981) gives a better approach of the real behaviour because it introduces the radial displacement at soil-column interface. It is rigorous in its development but it is still on the unsafe side because columns usually reach their plastic limit even for not very high applied loads.

The semi-empiric solution of Priebe (1976, 1995) is more realistic due to the consideration of column yielding. It is based on simplifications, gravel dilatancy is neglected and other parameters, such as column stiffness, are introduced as later corrections to the original solution.

Although the analytical model developed in this thesis was intended to study the consolidation process, it predicts also the initial and final stages. The final settlement reduction is in the same range as Priebe's method (1995), but including the dilatancy of the gravel and without any empirical hypothesis or later correction. The stress concentration factors agree with field measurements (3-10) and show the influence of column radial bulging and plastic strains.

- About consolidation analysis

A common way of adapting the consolidation solutions for drains to stone columns is to assume that the vertical stress on the soil is kept constant but less than the

applied load. The final stress transfer is often used for this purpose. In this manner, the settlement reduction is included but the relative consolidation time keeps the same.

Han and Ye (2001) proposed a more realistic analysis; they consider the variation of the vertical stress on the soil with time. The reduction of the consolidation time is included by means of a modified consolidation coefficient. However, this solution is on the unsafe side because oedometric conditions overestimate the stress concentration on the column, as commented above.

The analytical model developed in this thesis improves these previous approaches because the radial plastic bulging of the column is considered. Similarly to Han and Ye (2001), the reduction of the consolidation time is included by means of modified consolidation coefficients. However, the values of these coefficients are more realistic. Numerical analyses show a better agreement with the proposed solution. The main assumption of the approach developed in this thesis is the use of the average pore pressure along the radius, as in all the previous solutions for radial drainage.

The algorithm of the theoretical model developed is directly usable in a spread sheet for the design of actual cases (Appendix A).

- About field instrumentation

During the stone column installation, specially by vibrodisplacement, the surrounding soil is altered. Pore pressures at any point increase and they reach their peaks when the vibrator is located at the same depth. These peaks of pore pressure fit a logarithmic law with the distance to the column, as the cavity expansion theory predicts. The deeper the piezometers are and the more columns have been installed in the surroundings, the higher pore pressures are measured. In the instrumented case, the dissipation of pore pressures was very fast, and no remaining excess pore pressures exist when the embankment construction started.

The smear caused by the stone column installation may lead to a decrease in the undrained shear strength in sensitive soils. The installation may also increase the lateral stresses. These facts may explain the higher pore pressure increments when more columns have been installed in the surroundings.

In soft soils, a good soil characterization, based on “in situ” tests, such as piezocones with dissipation tests, is needed. Special care should be taken with the interpretation of these tests. In this kind of soils, the lab tests may be done in the softer parts of the sample, leading to conservative values of the stiffness and the consolidation coefficient.

Besides the soil characterization, it is important to test and control the gravel used in the columns, specifically, its stiffness, density, friction and dilatancy angles.

Field instrumentations depend on the construction time, funds and organization of the site work. In particular, the schedule of the instrumentation readings should match the embankment construction process.

The dissipation of the excess pore pressures predicted by the theoretical model developed in this thesis could not be compared with field measurements, because this process was too fast in both field sites. The soil permeability, the improvement with stone columns and the stepped construction of the embankment may explain this fact.

The stress concentration factors inferred from the stresses measured on the total pressures cells are generally in the usual range assessed in actual cases (2-6), and with the usual scatter of the values measured at the cells. In Arbuio, the inclinometers were really useful to detect a situation close to failure. Safety factor was nearly 1 for horizontal displacement rates about 0.1 mm/day for constant embankment height.

Numerical models of finite elements confirmed as a useful tool to predict and control the behaviour of the instrumented sites. The agreement between the safety factors worked out with finite elements and limit equilibrium was reasonable, with a tendency to give slightly smaller values with the numerical analysis.

Future work

This doctoral thesis tries to improve the knowledge of the stone column behaviour and encourage further research. From the work done and the conclusions gained, the following guidelines are proposed to continue studying stone columns.

- Analytical solutions

All the solutions shown for the radial consolidation around vertical drains or stone columns use an average excess pore pressure along the radius. Although it is not important for practical cases because the error is located at the beginning of consolidation, it would be advisable to develop a solution that fulfilled the initial condition. This solution would need a coupled analysis of the problem. The use of poro-elasticity concepts, with finite stiffness of water, could make the resolution easier.

The analytical model developed in the thesis may be completed to include smear around the column, finite permeability of the column and ramp load. The model needs to be verified through more numerical analyses, lab tests and site instrumentation. This would allow checking what is well reproduced by the model and what is not.

- Numerical analyses

There are lots of new developments in this field: more complex behaviour models, comparisons between plane strain models and axis-symmetric ones, three-dimensional analyses... It would be convenient to sum them up and give some guidelines for a common stone column treatment design.

- Site instrumentation

Field measures made in this thesis are not completely satisfactory because they overlook the consolidation process. The instrumentation of an embankment on very low-permeability soft soil improved with stone columns is a future work that may well be very useful. A good soil characterization needs CPTU tests (“piezocones”) and

dissipation tests exactly at the instrumentation location and piezometer depth respectively, otherwise consolidation coefficient value will not be reliable. Settlement profiles and extensometers are very useful. It is always advisable that one measure level of the extensometer goes far deeper than stone column length; settlement under columns is not always insignificant. A trial embankment is costly but it has lots of advantages against a real site, which is always conditioned by its demands and requirements.

Stone column installation effects are being widely revised. The increase of lateral stresses in the surrounding soil and its following stiffening has to be confirmed with more site measurements.

- Similar improvement techniques

Many similar improvement techniques are being developed. One of the most successful is controlled modulus columns (CMCs), which are grouted columns. Another alternative is surrounding the column with a geotextile to increase its lateral confinement. Its construction technique has drawbacks but its study and develop may give satisfactory results.

Referencias

- Álvarez, E., Herrero, M.T. y Ruiz, M.R. 1999. Variable Compleja. Ecuaciones Diferenciales. Colección Fundamentos Matemáticos, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria.
- Atkinson, M.S. y Eldred, P.J.L. 1981. Consolidation of soil using vertical drains. *Géotechnique*, 31, 33-43.
- Balaam, N.P. y Booker, J.R. 1981. Analysis of rigid rafts supported by granular piles. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5, 379-403.
- Balaam, N.P. y Booker, J.R. 1985. Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 9, 331-351.
- Balaam, N.P., and Poulos, H.G. 1983. The behaviour of foundations supported by clay stabilised by stone columns. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 199-204.
- Barco, J.A., Cañizal, J., Castro, J., da Costa, A. y Sagasetta, C. 2006. Numerical analysis of an open excavation close to an embankment on improved ground. 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz, 525-532.
- Barco, J.A., Cañizal, J., Castro, J., da Costa, A. y Sagasetta, C. 2007. Interaction between an open excavation and an embankment on improved ground. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 1819-1824.
- Barksdale, R.D. y Bachus, R.C. 1983. Design and Construction of Stone Columns. Report FHWA/RD-83/026. National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Barron, R.A. 1948. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Transactions ASCE*, 113, 718-742.
- Bejan, A. 1993. Heat transfer. Ed. John Wiley & Sons, EEUU.
- Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Fannin, R.J. y Holtz, R.D. 2002. Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft Bangkok clay: a case study of the new Bangkok International Airport Project. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 304-315.
- Bielza, A. 1999. Manual de técnicas de mejora del terreno. U.D. Proyectos. E.T.S.I.M. Madrid.
- Biot, M. 1941. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.
- Booker, J.R. y Small, J.C. 1975. An investigation of the stability of numerical solution of Biot's equations of consolidation. *International Journal of Solids and Structures*, 11, 907-917.

- Brinkgreve, R.B.J. y Broere, W. 2006. Plaxis 3D Foundation Manual. A.A. Balkema Publishers.
- Carrillo, N. 1942. Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. *Journal of Mathematical Physics*, 21(1), 1–5.
- Carslaw, H.S. y Jaeger J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, London.
- Castro, J. 2007. Pore pressures during stone column installation. 18th European Young Geotechnical Engineers' Conference (formato CD), Ancona.
- Castro, J. y Sagasetta, C. 2008. Consolidation around stone columns. Influence of column deformation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (pendiente de aceptación).
- CEDEX. (Página consultada el 25 de enero de 2005). Laboratorio de geotecnia, mejora del terreno, [On-line]. Dirección URL: <http://www.cedex.es/lg/asesora/mejora.html>
- Chun, B.S., Yeoh, Y.H., Sagong, M. y Kim, K.M. 2003. Reduction of settlement due to sand pile installation. Transportation Research Board (TRB) - 82nd Annual Meeting, Washington D.C.
- Cimentada, A. 2008. Análisis experimental en modelo reducido de la consolidación radial en un suelo blando mejorado con columnas de grava. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria (en preparación).
- Cryer, C.W. 1963. A comparison of the three-dimensional consolidation theories of Biot and Terzaghi. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 16, 401–412.
- Cui L, y Abousleiman Y. 2001. Time-dependent poromechanical responses of saturated cylinders. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 127, 391-398.
- Dimaggio, J.A. 1978. Stone Columns: A Foundation Treatment. Demonstration project n° 46, Federal Highway Administration, Washington DC.
- Dhouib, A., Wehr, J., Soyeze, B. y Priebe, H.J. 2004. Priebe's method: origin, development and applications. *International symposium on ground improvement*, Paris, 131-146.
- Gáb, M., Schweiger, H.F., Thurner, R. y Adam, D. 2007. Field trial to investigate the performance of a floating stone column foundation. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 1311-1316.
- Galavi, G., Scharinger, F. y Schweiger, H.F. 2007. Undrained behaviour of a multilaminate model with destructuration. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 955-960.
- Geocisa. 2007. Informe de instrumentación de la autovía N-332 de Almería a Valencia. Tramo: Variante de Sueca. Editado por Geocisa, Coslada (Madrid).
- Geocisa. (Página consultada el 20 de octubre de 2006). Referencias Técnicas, columnas de grava, [On-line]. Dirección URL: http://www.geocisa.com/referencias_tratamiento.html

- Gibson, R.E., England, G.L. y Hussey, M.J.L. 1967. The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay: I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers. *Géotechnique*, 17(1), 261-273.
- Greenwood, D.A. 1990. Assurance of performance of stone columns. *Deep Foundation Improvements: Design, Construction and Testing*. ASTM, Bachus ed., Philadelphia.
- Guétif, Z., Bouassida, M. y Debats, J.M. 2007. Improved soft clay characteristics due to stone column installation. *Computers and Geotechnics*, 34(2), 104-111.
- Han, J. y Ye, S. 1991. Field tests of soft clay stabilized by stone columns in coastal areas in China. 4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Stresa, 243-248.
- Han, J. y Ye, S.L. 2001. A simplified solution for the consolidation rate of stone column reinforced foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(7), 597-603.
- Hansbo, S. 1981. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 677-682.
- Hansbo, S. 1997. Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow. *Géotechnique*, 47(5), 983-992.
- Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D. y Cinioglu, F. 1995. Modelling the effect of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 795-807.
- IKD Statistics. (Página consultada el 20 de mayo de 2005). International Knowledge Database for Ground Improvement Technologies, [On-line]. Dirección URL: <http://tc17.poly.edu/ikd.htm>
- Indraratna, B. y Redana, I.W. 1997. Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(5), 474-478.
- Intecsa-Inarsa. 2005. Informe geotécnico sobre los tratamientos de estabilización de los terraplenes (de la Variante de Sueca). Editado por Intecsa-Inarsa S.A., Madrid.
- Jiménez Salas, J.A., Justo Alpañes, J.L. y Serrano González, A. 1975. *Geotecnia y Cimientos I*. Ed. Rueda, Madrid.
- Juran, I. y Guermazi, A. 1988. Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(8), 930-943.
- Keller. 2005. Keller Publications. Keller Grundbau GmbH (formato CD), Offenbach.
- Kirsch, F. 2004. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.
- Kirsch, F. y Sondermann, W. 2003. Field Measurements and Numerical Analysis of the Stress Distribution below Stone Column Supported Embankments and their Stability. Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice, Essen, 595-600.
- Kondner, R.L. 1963. A hyperbolic stress strain formulation for sands. 2nd Pan-American Conference on Soil and Foundation Engineering, Brazil, 289-324.

- Ladd, C.C. y Eggers, L. 1972. Consolidated-undrained direct-simple shear tests on saturated clays. Research Report R72-82, nº 284, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Lane, K.S. 1948. Discussion to Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions ASCE, 113, 743-747.
- Leo, C.J. 2004. Equal Strain Consolidation by Vertical Drains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(3), 316-327.
- Leroueil, S. 2001. Natural slopes and cuts (39th Rankine Lecture). Géotechnique, 51(3), 197-243.
- Leroueil, S., Magnan, J-P. y Tavenas F. 1985. Embankments on Soft Clays (Remblais sur argiles molles). Ed. Lavoisier, Paris.
- Madhav, M.R., Park, Y.M. y Miura, N. 1993. Modelling and study of smear zone around band shape drains. Soil and Foundations, 33(4), 135-147.
- Malarvizhi, S.N. e Ilamparuthi, K. 2004. Load versus settlement of claybed stabilized with stone & reinforced stone columns. 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, Seoul, 322-329.
- Mandel, J. 1953. Consolidation des sols (étude mathématique). Géotechnique, 3, 287-299.
- McKenna, J.M., Eyre, W.A. y Wolstenholme, D.R. 1975. Performance of an embankment supported by stone columns in soft ground. Géotechnique, 25 (1), 51-59.
- Ministerio de Fomento. 2002. Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera. Dirección General de Carreteras. Serie Monografías.
- Mitchell, J.K. 1981. Soil improvement: state-of-the-art report. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 509-565.
- Moseley, M.P. 2004. Ground Improvement. Ed. Spon Press, London.
- Muir Wood, D. 2004. Geotechnical Modelling (Applied Geotechnics). Ed. Taylor & Francis, London.
- Ortiz Berrocal, L. 1998. Elasticidad. Ed. McGraw-Hill, Madrid.
- Pennine. (Página consultada el 23 de octubre de 2007). Pennine Projects, [On-line]. Dirección URL: <http://www.pennine.co.uk/pennine-projects.html>
- Pestana, J.M., Hunt, C.E. y Bray, J.D. 2002. Soil deformation and excess pore pressure field around a Closed-Ended Pile. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 128(1), 1-12.
- Plaxis. 2005. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Plaxis B.V., The Netherlands.
- Potts, D. y Zdravkovic, L 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering: theory. Ed. Thomas Telford, London.
- Priebe, H.J. 1976. Abschätzung des Setzungsverhaltens eines. durch Stopverdichtung Verbesserten Baugrundes. Die Bautechnik, 53(5), 160-162.
- Priebe, H.J. 1995. Design of vibro replacement. Ground Engineering, 28(10), 31-37.

- Pulko, B. y Majes, B. 2005. Simple and accurate prediction of settlements of stone column reinforced soil. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, 1401-1404.
- Randolph, M.F. y Wroth, P. 1979. An analytical solution for the consolidation around a driven pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3, 217-229.
- Raju, V.R., Hari Krishna, R. y Wegner, R. 2004. Ground Improvement using Vibro Replacement in Asia 1994 to 2004 – A 10 Years Review. 5th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur.
- Rice, J.R. y Cleary M.P. 1976. Some basic diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14(2), 227–241.
- Rowe P.W. 1962. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Royal Society of London, Mathematical and Physical Sciences*, 269, Series A: 500–557.
- Sainz Borda, J.A. 1979. Análisis numérico bidimensional de la consolidación primaria de arcillas blandas saturadas. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander.
- Sanglerat, G. 1972. The penetrometer and soil exploration; interpretation of penetration diagrams — Theory and Practice. Elsevier Publishing Co., Amsterdam.
- Sagaseta, C. 2006. Avances en el diseño de las técnicas de mejora del terreno. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, 6^a Sesión – Técnicas de Mejora del Terreno, Madrid.
- Sánchez-Alciturri, J.M., Cañizal, J. y Sagaseta, C. 1999. Field performance of staged construction of an embankment. 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Amsterdam, 1571-1576.
- Schaefer, V.R. 1997. Ground improvement, Ground Reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987-1997. *Geotechnical Special Publication n° 69*, ASCE.
- Schanz, T. 1998. Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien, Habilitation, Stuttgart Universität.
- Scharinger, F. y Schweiger, H. F. 2005. Undrained response of a double hardening multilaminar model for soils. 11th International Conference of IACMAG, Turin, 505–512.
- Slope/W. 2001. Slope Stability Analysis Software. Geo-Slope International Ltd., Canada.
- Schlosser, F. y Simon, B. 2006. Soil reinforcement for foundations. 13th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana, 151-162.
- Schofield, A.N. y Wroth, C.P. 1968. *Critical state soil mechanics*. Ed. Mc-Graw-Hill, London.
- Schweiger, H.F. 1989. Finite element analysis of stone column reinforced foundations. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, University of Wales, Swansea.
- Sills, C. 1975. Some conditions under which Biot's equations of consolidation reduce to Terzaghi's equation. *Géotechnique*, 25, 129-132.

- Soderberg, L.O. 1969. Consolidation theory applied to foundation pile time effects. *Géotechnique*, 12(3), 217-225.
- Søreide, O.K., Nordal, S. y Bonnier, P.G. 2002. An impact friction hardening model for soil materials. 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Paris, 155–161.
- Tan, S.A. y Oo, K.K. 2005. Finite element modeling of stone columns - A case history. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, 1425-1428.
- TC-17. (Página consultada el 14 de noviembre de 2004). About the Technology, [On-line]. Dirección URL: http://tc17.poly.edu/att_intermediate.htm
- Terzaghi, K. y Frölich, O.K. 1936. *Theorie der Setzung von Tonschichten*. Franz Deuticke, Leipzig, Wien.
- Van Impe, W.F. 1989. Soil improvement techniques and their evolution. A.A. Balkema, Rotterdam, 77-88.
- Van Impe, W.F. 2001. Recent advances in soil reinforcement and improvement. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, 2755-2758.
- Van Impe, W.F. y De Beer, E. 1983. Improvement of settlement behaviour of softy layers by means of stone columns. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 309-312.
- Verruijt, A. (Página consultada el 23 de octubre de 2006). *Soil Dynamics Book*, [On-line]. Dirección URL: <http://geo.verruijt.net>
- Vesic, A.S. 1972. Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics Foundations Division, ASCE*, 98(SM3), 265–290.
- Visschedijk, M. 2005. Dutch design models for embankments. 1st AMGISS Workshop, Glasgow.
- Walker, R. e Indraratna, B. 2006. Vertical drain consolidation with parabolic distribution of permeability in smear zone. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132(7), 937-941.
- Wang, H.F. 2000. *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*. Princeton University Press, Princeton.
- Watts, K.S., Johnson, D., Wood, L.A. y Saadi, A. 2000. An instrumented trial of vibro ground treatment supporting strip foundations in a variable fill. *Géotechnique*, 50(6), 699-708.