

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DINÁMICAS EN EL DISEÑO DE MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN DE LADERAS: EL CASO DEL DESLIZAMIENTO DE DIEZMA (GRANADA)



M.J. Rodríguez-Peces¹, J.M. Azañón^{2,3}, J. García-Mayordomo⁴, E. Troncoso^{2,3}, M. Tsige¹

¹Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040-Madrid, España. martinjr@geo.ucm.es, meaza@geo.ucm.es

²Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. jazanon@ugr.es

³Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC), Granada, España.

⁴Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid), España. julian.garcia@igme.es

RESUMEN

En este trabajo se ha analizado la eficacia de las medidas de estabilización de taludes en un área activa sísmicamente. Este análisis se ha realizado tanto en condiciones estáticas como dinámicas, considerando las aceleraciones sísmicas más probables para el emplazamiento. Para ello se ha realizado un análisis de estabilidad retrospectivo de un deslizamiento complejo (el deslizamiento Diezma) ubicado en el sur de España utilizando datos geotécnicos, geofísicos y geológicos de detalle. Los factores desencadenantes fueron la presencia de un nivel freático somero y la reducción de la resistencia al corte de los niveles de arcilla de alta plasticidad a valores residuales. En el 2010, tras casi 10 años desde la instalación de las medidas de estabilización, se produjo una nueva reactivación del deslizamiento relacionada con un mal funcionamiento de la primera línea de pozos de drenaje profundo. La segunda y tercera línea de pozos y la barrera de pilotes anclados parecen funcionar con eficacia, deteniendo el avance del deslizamiento hacia el pie de la ladera. Sin embargo, la reactivación del deslizamiento de Diezma es esperable en el caso de que un terremoto de baja magnitud, relativamente frecuentes en la zona, se produzca cerca del deslizamiento.

Palabras clave: Autovía A-92, Cordillera Bética, Deslizamiento, Diezma, Newmark, Pozo de drenaje

SUMMARY

In this paper the effectiveness of slope stabilization measures in a seismic active area have been analysed. A complete failure analysis of a complex landslide located in Southern Spain (the Diezma landslide) has been performed using detailed geotechnical, geophysical and geological data. The triggering factors were a shallow water table and the reduction of the shear strength parameters of the high-plasticity clay levels to residual values. The 2010 landslide reactivation was related to a bad performance of the first line of deep drainage wells. The second and third line of wells and the anchored piles barrier seem to work effectively by stopping the landslide from reaching the toe of the slope. However, the reactivation of the Diezma landslide is expected in the case that a low magnitude earthquake, relatively common in the study area, occurs close to the landslide location.

Keywords: A-92 motorway, Betic Cordillera, Diezma, Drainage well, Landslide, Newmark

Introducción

Los deslizamientos ocurren con bastante frecuencia durante la temporada de lluvias debido al desarrollo de importantes presiones intersticiales en la masa de la ladera. Las medidas tomadas para controlar la ocurrencia de deslizamientos son generalmente diseñadas siguiendo criterios empíricos. Sin embargo, no existe un modelo generalmente aceptado para considerar la eficacia de las diferentes técnicas de estabilización. Las zanjas y los pozos se utilizan ampliamente para reducir las presiones intersticiales provocadas por el agua. A pesar de que estas obras de drenaje pueden ser muy eficaces en suelos margosos y arcillosos, su correcto funcionamiento no ha sido validado a través del tiempo por medio de observaciones directas o indirectas. En este trabajo la eficacia de las medidas de estabilización, en particular los pozos de drenaje profundo, se ha analizado en un deslizamiento complejo que afecta a una importante autovía (A-92) en el sureste de España. Para ello se ha estudiado la evolución del deslizamiento de Diezma considerando cinco etapas: 1) la ladera antes y después de la construcción de la autovía A-92; 2) la ladera durante el deslizamiento de Diezma de 2001; 3) la ladera después de las medidas de estabilización; 4) la ladera durante la reactivación de 2010; y 5) posible reactivación futura. En cada caso, el mecanismo de rotura de la ladera se identificó con información geológica, geotécnica y geofísica de detalle.

El deslizamiento de Diezma

El deslizamiento de Diezma está localizado en el norte de Sierra Nevada (Cordillera Bética, sur de España), cerca de la localidad de Diezma (Fig. 1). La masa de deslizamiento está formada por arcillas, limos y margas de alta a moderada plasticidad que contienen bloques de calizas y dolomías. Estas litologías forman parte de una formación de tipo flysch, que representa una secuencia turbidítica del Cretácico Inferior-Mioceno (Bourgeois, Chauve y Didon, 1974). En el área de Diezma, el flysch está estructuralmente superpuesto sobre las pizarras, filitas, areniscas y conglomerados del Complejo Maláguide (Dominio de Alborán). El Dominio Sudibérico está formado por calizas del Jurásico superior y dolomías pertenecientes a la Zona Subbética, que cabalgaron sobre el Complejo Maláguide. Estas rocas carbonatadas afloran al norte del deslizamiento de Diezma y actúan como un acuífero kárstico sin confinar que transfiere una gran cantidad de agua hacia el sur, muy cerca de la cabeza del deslizamiento. También existen importantes manantiales en la superficie de contacto entre las rocas carbonatas y los suelos de baja permeabilidad bajo el deslizamiento, de manera que con frecuencia el nivel freático es alto después de un periodo de fuertes lluvias.

El deslizamiento de Diezma tuvo lugar el 18 de marzo de 2001, tras un periodo de alta precipitación y causó importantes daños en la autovía de Sevilla-Almería (A-92), que fue cerrada durante varios días ya que el talud se derrumbó por completo (Fig. 2). La estabilización del deslizamiento comenzó de inmediato mediante el cambio de pendiente de la ladera, la instalación de sistemas adicionales de drenaje superficial y pozos de drenaje, así como la construcción de una barrera de pilotes anclados (Oteo, 2001 y 2003). A pesar de estas medidas, el deslizamiento fue parcialmente reactivado como consecuencia de las fuertes lluvias registradas durante el invierno de diciembre de 2009 a febrero de 2010. El deslizamiento de Diezma es un movimiento complejo que abarca una superficie de 7.76 ha, con una longitud máxima de 510 metros y la anchura máxima de 205 m. El volumen de deslizamiento es de aproximadamente 1.2 hm^3 , con un espesor medio de 20 m. A partir de observaciones de campo, el cuerpo del deslizamiento se pueden dividir en tres partes diferentes: la cabecera, la zona intermedia y el pie. La zona de cabecera se encuentra muy cerca de la antigua carretera de Granada-Almería (CN-342), donde se observaron varios escarpes de escala métrica. El escarpe principal correspondiente a la reactivación de 2010 se localiza a unos 50 metros al norte de esta carretera, la cual colapsó parcialmente. La parte intermedia del deslizamiento se produjo desplazamiento lateral y algunos escarpes secundarios que produjeron encharcamientos y zonas elevadas con grietas de tracción en las crestas (Azañón et al., 2009). Además, hay muchas grietas laterales de varias decenas

de metros con la misma orientación que el sentido de movimiento de la masa que han dañado la carretera intermedia construida durante las obras de restauración de la ladera. En el sector del pie, el espesor de masa deslizada es mayor que en la zona central (cerca de 30 m) y las grietas principales se abren oblicuamente a la dirección del deslizamiento. Estas grietas se pueden interpretar como el escarpe relacionado con la primera superficie de rotura de la ladera. La mitad inferior del pie corresponde a la zona de acumulación de un flujo de tierra que cubrió parte de la autovía A-92. Todos los escarpes observados están relacionados con deslizamientos rotacionales desarrollados sucesivamente en los suelos ricos en arcilla de la formación flysch. Estos suelos de baja permeabilidad también han favorecido el desarrollo de encharcamientos en la cabecera y zonas intermedias del deslizamiento.

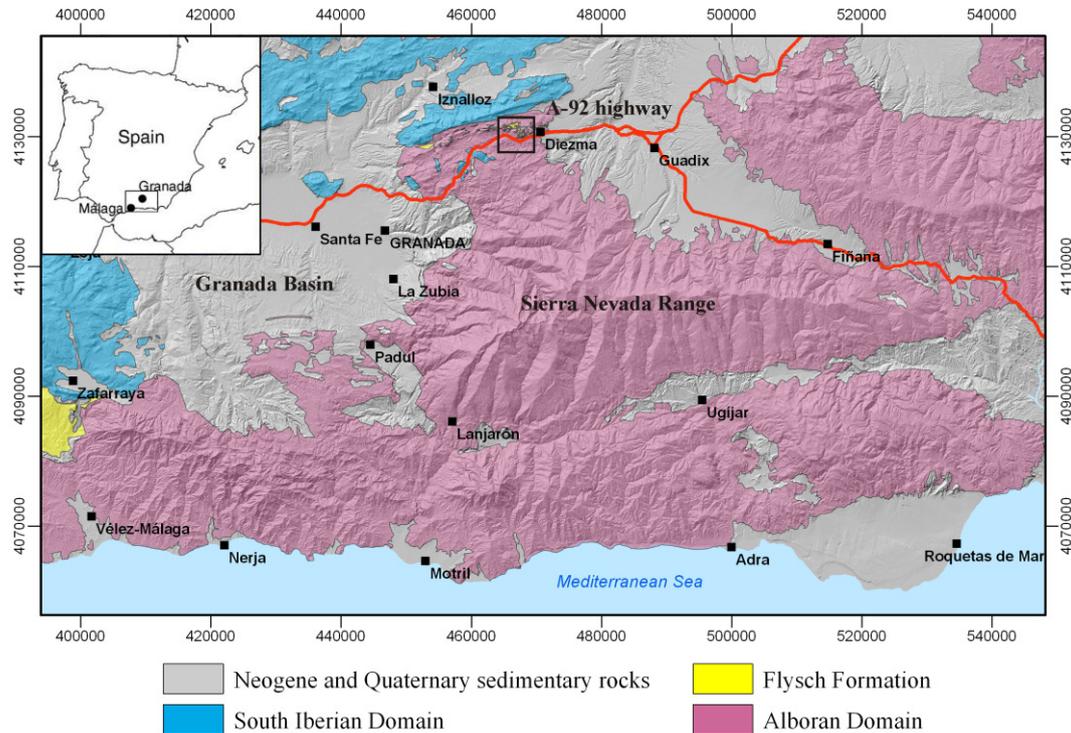


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la parte central de la Cordillera bética (S España). La localización del deslizamiento de Diezma está indicada por un rectángulo.



Figura 2. Vista panorámica del pie del deslizamiento de Diezma durante el colapso de 2001 sobre la autovía A-92.

Investigaciones geotécnicas

La superficie de rotura principal del deslizamiento se ha localizado mediante datos de sondeos y ensayos geofísicos disponibles (Azañón et al. 2006, 2009) complementados con observaciones de campo. Los datos geofísicos derivan de perfiles obtenidos mediante tomografía de resistividad eléctrica transversal y longitudinal (ERT), que permitió determinar la forma del contacto entre el deslizamiento y el sustrato. El espesor del depósito deslizado varía desde menos de 10 m a unos 30 m. Los datos geofísicos se compararon con los datos de los inclinómetros y extensómetros instalados en los sondeos para verificar la profundidad de la superficie de rotura. Esta superficie crítica está relacionada con un nivel arcilloso sobresaturado rico en esmectita que es el límite entre los depósitos deslizados y el sustrato. Además, Azañón et al. (2006) indicaron la existencia de tres superficies de deslizamiento mediante los datos registrados en los inclinómetros. Los parámetros geotécnicos correspondientes a las unidades litológicas (Tabla 1) han sido obtenidos a partir de ensayos de corte directo de tipo consolidado y drenado (CD) realizados en muestras inalteradas extraídas de los sondeos en el deslizamiento.

Tabla 1. Resumen de las principales propiedades geotécnicas de los materiales presentes en el deslizamiento de Diezma. Entre paréntesis se muestra el rango de variación de los parámetros. γ , Peso específico; γ_{sat} , Peso específico saturado; c_p , Cohesión de pico; Φ_p , Ángulo de fricción de pico; c_r , Cohesión residual; Φ_r , Ángulo de fricción residual.

Material	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c_p (kPa)	Φ_p (°)	c_r (kPa)	Φ_r (°)
Depósitos deslizados	18.19 (±0.91)	20.60	5.4 (±3.2)	31 (±4)	0.6 (±0.5)	11 (±3)
Arcilla rica en esmectita	15.24 (±0.49)	17.66	1.3 (±0.7)	21 (±4)	0.4 (±0.3)	8 (±1)
Sustrato rocoso (pizarras)	25.02	25.51	49.1	35	-	-

Reconstrucción del deslizamiento de Diezma

El análisis de estabilidad retrospectivo del deslizamiento de Diezma se ha realizado utilizando el programa Slide (Rocscience Inc. 2003), que permite calcular los factores de seguridad (SF) para superficies circulares y no circulares mediante diferentes métodos de equilibrio límite. Se ha utilizado el método de Morgenstern-Price ya que se considera el más apropiado para roturas desarrolladas en suelos y es válido para roturas circulares y no circulares. La localización de la superficie de rotura en profundidad ha sido fijada combinando los datos de los sondeos, estudios geofísicos y observaciones de campo. Las roturas circulares calculadas por el programa se utilizaron para completar la superficie de rotura en las zonas de la cabecera y el pie.

El deslizamiento de Diezma antes de la construcción la autovía A-92

Antes de la construcción de la autovía A-92, el deslizamiento se mantuvo estable. El análisis indica un alto factor de seguridad al considerar los valores de resistencia al corte de pico (FS=2.43) y un aceptable FS para los valores residuales (1.15), suponiendo un nivel freático profundo. La ladera se mantendría estable, incluso después de un período de fuertes lluvias considerando un nivel freático a 3 m de profundidad. En este caso el factor de seguridad mínimo para las condiciones de resistencia al corte de pico sigue siendo muy alto (FS=2.23) mientras que con los valores residuales el FS se acerca a la condición de inestabilidad (FS=1.09).

El deslizamiento de tierra Diezma después de la construcción de la autovía A-92

La construcción de la autovía A-92 en 1993 modificó sustancialmente la geometría del pie de la ladera natural. El talud proyectado tenía un perfil 1:1.5 (35°) con una berma intermedia (Fig. 3). Incluso después de esta modificación significativa de la topografía, la ladera se mantuvo estable. Según el análisis, el FS considerando los parámetros de

resistencia al corte de pico y un nivel freático profundo (18-20 m) sigue siendo muy elevado (FS=2.12), mientras que si consideramos la resistencia al corte residual la ladera permanece prácticamente estable (FS=1.05). Esta situación encaja muy bien con la ocurrencia de un pequeño deslizamiento poco profundo que tuvo lugar en mayo de 2000 en el pie de la ladera, el cual representa la primera señal de inestabilidad en el área del deslizamiento tras la construcción de la autovía A-92.

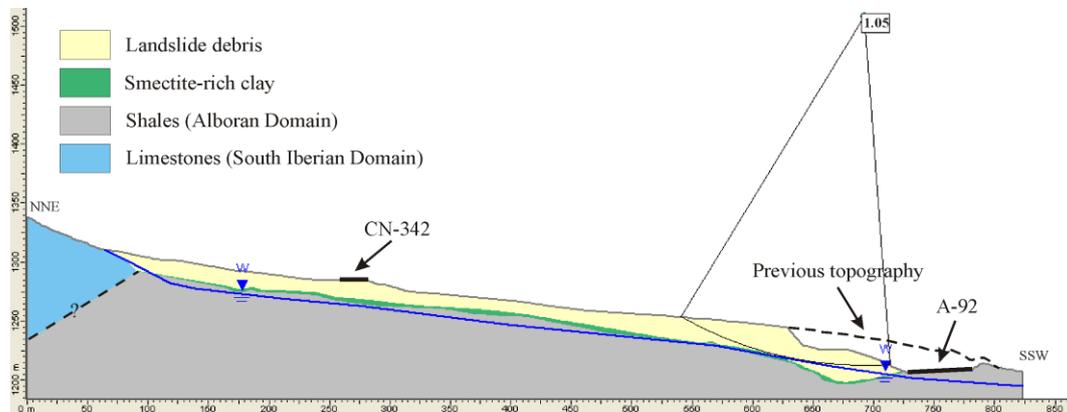


Figura 3. Perfil longitudinal del deslizamiento de Diezma tras la construcción de la autovía A-92 considerando un nivel freático profundo (línea azul) y parámetros resistentes residuales.

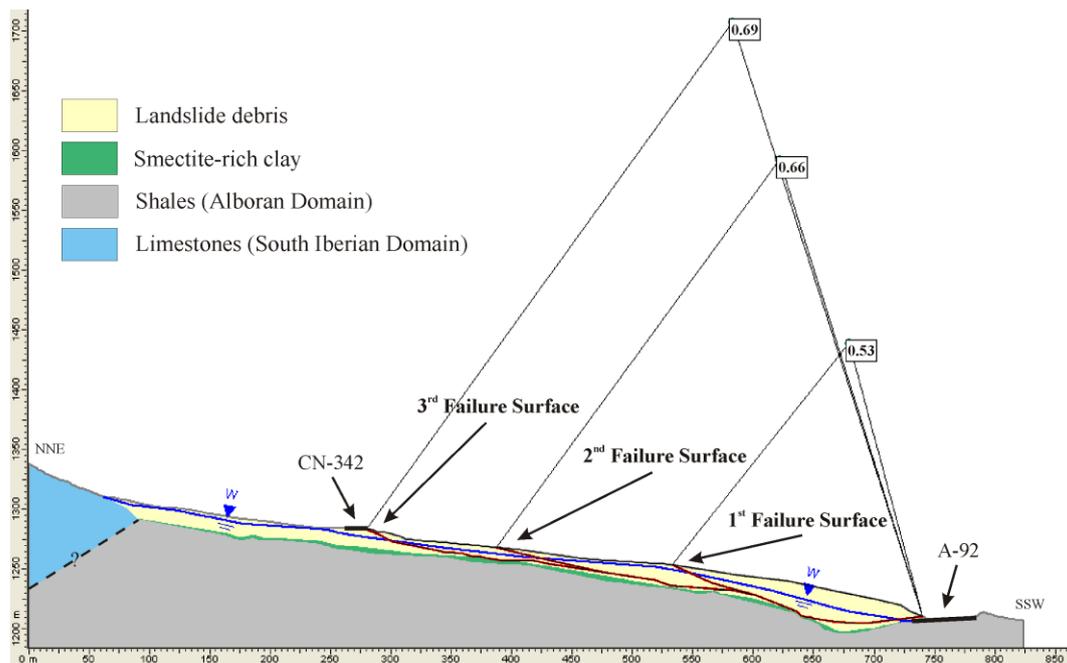


Figura 4. Perfil longitudinal del deslizamiento de Diezma tras la construcción de la autovía A-92 considerando un nivel freático somero (línea azul) y parámetros resistentes residuales. Las superficies de rotura se muestran mediante líneas rojas.

El deslizamiento de tierra Diezma durante el colapso de 2001

La rotura completa del deslizamiento de Diezma comprende tres movimientos consecutivos. El primero tuvo lugar el 18 de marzo de 2001, tras un período de fuertes lluvias, que fue claramente el principal factor desencadenante. El deslizamiento cubrió el pie del talud, que colapsó sobre la autovía A-92 cambiando la topografía, liberando agua y, por tanto, afectando a la profundidad del nivel freático (Fig. 4). Empleando los parámetros residuales y un nivel freático elevado, el FS obtenido fue tan bajo como 0.53. Unos días después, se produjo un segundo movimiento más extenso, cuyo escarpe principal se desarrolló en la parte intermedia de la ladera (Fig. 4). El factor de seguridad obtenido en

esta situación es de 0.66. Poco después, el tercer y último movimiento tuvo lugar. Este deslizamiento involucró prácticamente a toda la ladera, con el escarpe principal localizado cerca de la antigua carretera CN-342, que fue dañada (Fig. 4). El FS obtenido para este movimiento fue de 0.69.

El deslizamiento de Diezma después de los trabajos de restauración

Las obras de estabilización realizadas en el deslizamiento de Diezma consistieron en cuatro líneas de zanjas de drenaje superficial, tres líneas de pozos de drenaje profundo y la construcción de una barrera de pilotes anclados y un muro de contención al pie de la ladera (Oteo 2001 y 2003). Los pozos de drenaje profundo están interconectados por medio de drenajes subhorizontales para evacuar el agua fuera del cuerpo del deslizamiento. La primera línea de pozos fue diseñada para captar el agua del acuífero carbonatado situado a unos pocos metros por encima del deslizamiento. Las otras dos líneas de los pozos fueron diseñados para asegurar, en la medida de lo posible, que el nivel freático seguía siendo profundo (20 metros o más) y paralelo a la superficie a lo largo del eje del deslizamiento. Por esta situación, y asumiendo un funcionamiento perfecto de los sistemas de drenaje, se obtuvo un factor de seguridad de 1.44. Sin embargo, durante los estudios de campo en el 2005 se observó que el nivel freático era muy alto en el área de la cabecera del deslizamiento, indicando que los sistemas de drenaje no estaban funcionando correctamente en esta zona (Azañón et al., 2006). Además, algunas nuevas grietas fueron encontradas en la antigua carretera CN-342 que acrediten que el deslizamiento se mantiene activo en cabecera. Esto parece estar relacionado con el mal funcionamiento de la primera línea de los pozos. Sin embargo, al considerar los niveles piezométricos registrados durante los trabajos de campo de 2005 se obtuvo un factor de seguridad estable de 1.40.

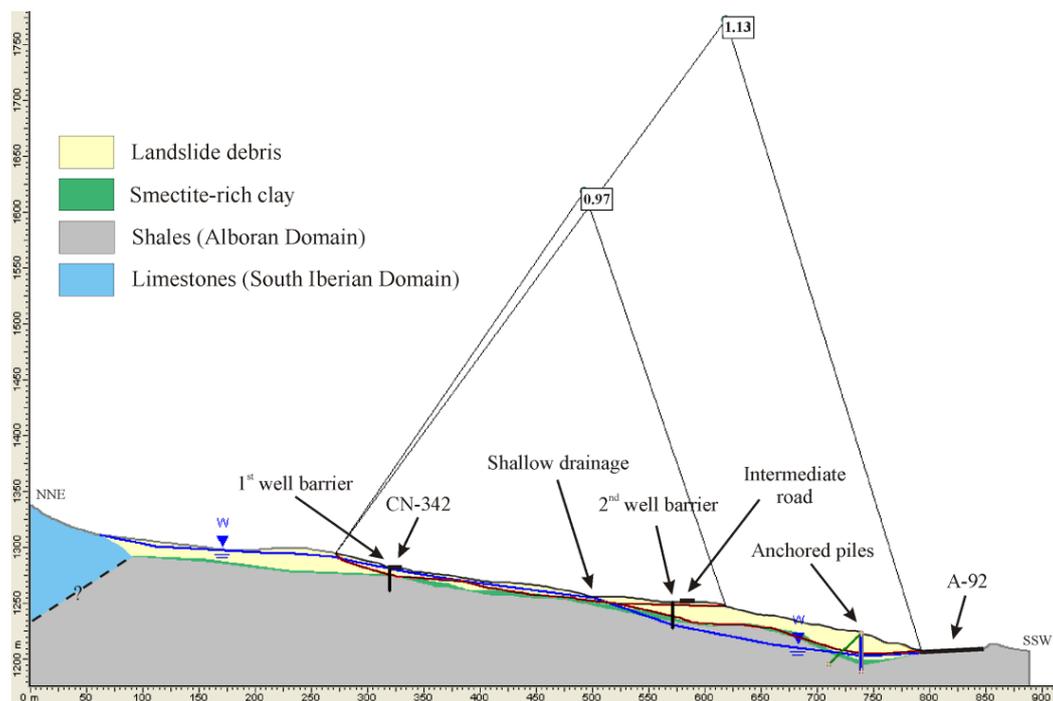


Figura 5. Perfil longitudinal del deslizamiento de Diezma tras la reactivación de 2010 considerando un nivel freático somero (línea azul) en la zona de cabecera y parámetros resistentes residuales. Las superficies de rotura se muestran mediante líneas rojas.

La reactivación del deslizamiento de Diezma de 2010

La reactivación del deslizamiento Diezma tuvo lugar tras el invierno de diciembre de 2009 a febrero de 2010. El escarpe principal se extendió sobre la antigua carretera CN-342, la cual fue dañada y trasladada hacia abajo. La primera línea de pozos de drenaje situada

cerca de la carretera y el primer sistema de drenaje superficial también fueron rotos y movilizados por el deslizamiento (Fig. 5). Sin embargo, el muro de contención de pilotes anclados evitó que el deslizamiento alcanzase la autovía A-92. Se ha obtenido un factor de seguridad de 1.13 para toda la ladera en su conjunto, mientras que teniendo en cuenta sólo la parte de la ladera que se movilizó, el factor de seguridad fue de 0.97 (Fig. 5).

Posible futura reactivación sísmica del deslizamiento de Diezma

El deslizamiento de Diezma está situado en el centro de la Cordillera Bética, cerca de la Cuenca de Granada, que es el área con mayor actividad sísmica en España. Una serie de terremotos importantes han ocurrido en esta zona desde tiempos históricos y, por lo tanto, las normativas sísmicas oficiales (NCSE-02, 2002) deben ser incluidos en el análisis de estabilidad de taludes y el diseño de estructuras de ingeniería (Rodríguez-Peces, 2008). La aceleración sísmica mínima necesaria para superar la resistencia al corte y el inicio de un deslizamiento se puede calcular siguiendo el método propuesto por Newmark (1965):

$$a_c = (FS - 1) g \operatorname{sen} \alpha$$

donde a_c es la aceleración crítica (en unidades de gravedad, $1g=9.81 \text{ m/s}^2$), g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo entre la vertical y una línea que une el centro de gravedad del deslizamiento y el centro del círculo de rotura. Suponiendo las condiciones existentes cuando se produjo la reactivación del deslizamiento de 2010, la aceleración crítica estimada es 0,02 g, que es un valor bastante bajo. Los valores más probables de magnitud y distancia al deslizamiento de los terremotos potenciales cuya aceleración máxima horizontal podría superar la aceleración crítica se han obtenido utilizando una serie de ecuaciones de predicción de movimiento del terreno (Skarlatoudis et al. 2003, Ambraseys et al. 2005, Akkar y Bommer 2007, Bindi et al 2009); véase Tabla 2. Este análisis indica que la reactivación del deslizamiento Diezma podrían ser provocada por un terremoto de $M_w=4.0-5.0$, lo que ocurre con relativa frecuencia en la zona (Morales, Singh y Ordaz, 1996; López Casado, Peláez Montilla y Henares-Romero 2001), siempre que se localice a menos de 25 km del deslizamiento.

Tabla 2. Valores de magnitud-distancia más probables de los terremotos que podrían exceder el valor de aceleración crítica del deslizamiento de Diezma actual. M_w : magnitud momento; R_{ep} : distancia epicentral hasta el deslizamiento de Diezma (km).

M_w	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
R_{ep}	≤ 10	≤ 15	≤ 25	≤ 40	≤ 60	≤ 100

Conclusiones

Las medidas de estabilización de laderas abarcan típicamente los sistemas de drenaje, tales como zanjas y pozos. En este trabajo se muestra como un diseño inadecuado y/o mantenimiento de los sistemas de drenaje puede ocasionar una fuerte reducción de su eficacia para disminuir las presiones intersticiales. La reactivación del deslizamiento de Diezma de 2010 se produjo tras un período de fuertes lluvias y a consecuencia de un inadecuado funcionamiento de la primera línea de pozos de drenaje profundo, que se sabe que han estado trabajando ineficientemente por lo menos desde el 2005. A pesar de ello, el muro de pilotes anclados colocado al pie de la ladera frenó el avance del deslizamiento y no alcanzó a la autovía A-92. Sin embargo, se ha comprobado que en esta situación, la reactivación del deslizamiento de Diezma puede ser provocada por un terremoto de poca magnitud (M_w 4.0 a 5.0), como ocurre con frecuencia en las cercanías del deslizamiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación CGL2008-03249/BTE,

Referencias:

- Akkar, S. y Bommer, J.J. (2007), "Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East". *B Seismol Soc Am*, 97, 511-530.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. y Smit, P.M. (2005), "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration". *B Earthq Eng*, 37, 1-53.
- Azañón, J.M., Azor, A., Cardenal Escarcena, J.F., Delgado García, J., Delgado Marchal, J., Gómez-Molina, A., López-Chicano, M., López-Sánchez, J.M., Mallorqui-Franquet, J.J., Martín, W., Mata de Castro, E., Mateos, R.M., Nieto, F., Peña-Ruano, J.A., Pérez-García, J.L., Puerma-Castillo, M., Rodríguez-Fernández, J., Teixidó-Ullod, T., Tomás-Jover, R., Tsige, M., Yesares, J. (2006), "Estudio sobre la predicción y mitigación de movimientos de ladera en vías de comunicación estratégicas de la Junta de Andalucía. Informe final". IACT, CSIC-UGR (Ed.), Granada, 380 pp.
- Azañón, J.M., Azor, A., Yesares, J., Tsige, M., Mateos, R.M., Nieto, F., Delgado, J., López-Chicano, M., Martín, W., Rodríguez-Fernández, J. (2010), "Regional-scale high-plasticity clay-bearing formation as controlling factor on landslides in Southeast Spain". *Geomorphology*, 120, 26-37.
- Bindi, D., Luzi, L., Massa, M. y Pacor, F. (2009), "Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA)". *B Earth Eng*, 8, 1209-1230.
- Bourgois, J., Chauve, P., Didon, J. (1974), "La formation d'argiles a blocs dans la province de Cadix, Cordilleras Betiques, Espagne". *Reun Annu Sci Terre*, 2, 79 pp.
- López-Casado, C., Peláez-Montilla, J.A. y Henares-Romero, J. (2001). "Sismicidad en la Cuenca de Granada". En: *La Cuenca de Granada. Estructura, Tectónica activa, Sismicidad, Geomorfología y dataciones existentes*. Sanz de Galdeano, C., Peláez-Montilla, J.A. y López-Garrido, A.C. (Eds.), CSIC-UGR, 148-157.
- Morales, J., Singh, S.K. y Ordaz, M. (1996), "Analysis of the Granada (Spain) earthquake of 24 June, 1984 (M = 5) with emphasis on seismic hazard in the Granada Basin". *Tectonophysics*, 257, 253-263.
- NCSE-02 (2002), "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y de construcción". B.O.E. de 11 de octubre de 2002, 35898-35967.
- Newmark, N.M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments". *Géotechnique*, 15, 139-160.
- Oteo Mazo, C. (2001), "Informe sobre el deslizamiento de Diezma (A-92) y las soluciones para estabilizarlo". *Consejería de Obras Públicas y Urbanismo de la Junta de Andalucía*, 60 pp.
- Oteo Mazo, C. (2003), "Diseño y ejecución del tratamiento para estabilizar el deslizamiento de Diezma (Granada)". *III Congreso Andaluz de Carreteras (Sevilla)*, 3, 40-52.
- Rocscience Inc. (2003), "Slide 5.0 User's Guide. Part I". 199 pp.
- Rodríguez-Peces, M.J. (2008), "Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca, Cuenca de Granada y Sierra Nevada". Tesis de Máster. Univ. de Granada, 254 pp.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, B.N., Margaris, N., Theodulidis, C., Papaioannou, I., Kalogeras, E.M., Scordilis, E.M. y Karakostas, V. (2003), "Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece". *B Seismol Soc Am*, 93, 2591-2603.