Scenari di pericolosità da frane sismoindotte

Roberto W. Romeo

Istituto di Geologia Applicata, Università degli Studi 'Carlo Bo', Campus Scientifico 'Sogesta', 61029 Urbino, rwromeo@uniurb.it

Earthquake-induced landslide hazard scenarios

ABSTRACT: Earthquakes trigger several kinds of ground failure phenomena, the most important and hazardous one being sure landslides. The local civil protection agencies need to plan their emergency activities prior the catastrophe occurs, thus to be prepared to promptly bring assistance to the population injured. One of the most or, probably, the most useful tool to do this, is the formulation of scenarios, describing how the dangerous event manifest itself, its consequences in terms of damages and losses and the countermeasures to be adopted to limit such negative effects. The present work deals with an example of earthquake-induced landslide scenarios carried out in an area close to the town of Urbino (Central Italy) where several mass movements affect the landforms even under static conditions. Recent seismotectonic studies pointed out the potential of earthquakes as large as 6 in magnitudes at distances not farer than 11 km. Therefore, a seismic hazard analysis for the area has been performed using two alternatives, mutually exclusive but collectively exhaustive, approaches: a probabilistic one vs. a deterministic one. The first has the potential to investigate a reference time interval, suitable, for instance, for a long-term planning of the land use. The second one is powerful for providing the worst-case scenario or, to borrow a terminology in use in the nuclear siting, the maximum credible earthquake that maximizes the collateral hazards. Both seismic hazard analyses were performed computing expected Arias Intensity's values, as the ground motion parameter recognized to be the better one to represent the effects of seismic excitations on the landslides behaviour. Landslides affecting the study area have been characterized from the geological (lithology and structural setting), geomorphological (kinematics and slope gradient) and geotechnical (physical and mechanical parameters) points of view. All the information have been stored in a spatially-referred database, ready to be analysed by means of a GIS tool (Arcinfo platform). Two kinds of analyses were performed: one referring to the spatial extent of the whole area (spatial analysis by pixels); the second one referring to the boundaries of the landslide bodies (local analysis). For both the analyses the coseismic displacements according to the Newmark's sliding block model, was assumed as a relative index of landslide performance under the seismic action. Newmark's displacements with a 10% chance to be exceeded as well as probabilities that a threshold displacement of 10 cm be exceeded within a reference time period of 50 years, were computed in the probabilistic analysis. Median, as well as 84-percentile of Newmark's displacements due to the maximum credible earthquake, were instead computed in the deterministic analysis. The probabilistic analysis allows computing the mean return periods of landslide reactivations due to earthquakes, thus providing an insight into the landslide hazard. Moreover, overlapping the coseismic displacements computed for the spatial and local analyses, allows highlighting those areas, bordering the landslide bodies, more prone to be involved in the failure by the occurrence of seismic actions, thus focusing on the evolution of the landslide areas in terms of enlargement, retreating or progressing behaviours. The deterministic analysis allows the formulation of the worst-case scenario of earthquake-induced landslide behaviour and it was used to perform a first-level analysis of risk. This analysis was carried out intersecting the landslide body areas – and a convenient buffer around them – failing under the earthquake with the elements at risk present in the areas themselves. A real estate inventory of the area highlighted the presence of houses, roadways and lifelines; for all of them a qualitative assessment of the risk associated with the slope sliding was performed, expressing it in terms of risk certain or potential to fail or collapse. Finally, the powerful of the GIS shall be stressed not only as a tool to store and display geographic data, but, over all, to analyse and perform logical and mathematical operations; at this scope calculation subroutines and macro instructions were specifically programmed to automates the analyses so that the scenario may be easily updated in real-time every time new data are available.

Key terms: seismic hazard, landslide, risk, GIS, central Italy *Termini chiave:* pericolosità sismica, frane, rischio, GIS, Italia centrale.

Riassunto

Le frane sismoindotte costituiscono l'effetto collaterale con

il maggior potenziale di danneggiamento in caso di terremoto. Le agenzie locali di protezione civile hanno pertanto la necessità di conoscere in anticipo lo svilupparsi

di tali fenomeni per ridurre il loro impatto sulla popolazione colpita. A tale scopo la predisposizione di scenari rappresenta probabilmente lo strumento più efficace di previsione e mitigazione delle condizioni di rischio derivanti dall'innesco di frane a seguito di forti eventi sismici. Il presente lavoro mostra un esempio di scenario di un'area, prossima alla città di Urbino, affetta già in condizioni statiche da un elevato grado di dissesto del territorio. Le condizioni di sismicità dell'area sono state investigate sia in termini probabilistici (analisi di pericolosità propriamente detta) sia in termini deterministici al fine di ricavare, rispettivamente, le azioni attese con un certo livello di probabilità in un tempo di riferimento, sia le massime azioni derivanti dal terremoto più gravoso per l'area. Le frane censite sul territorio sono state a loro volta investigate sia in termini geomorfologici (litologia, assetto strutturale, pendenze, cinematismi, ecc.) sia in termini geotecnici (proprietà fisico-meccaniche). Sulla base di un modello cinematico di comportamento (analisi di Newmark) sono state quindi definite le condizioni di suscettività al collasso delle diverse fenomenologie franose investigate e analizzate le loro ripercussioni in termini di impatto sulle principali strutture e infrastrutture presenti nell'area. Infine, gli scenari sono stati predisposti in ambiente GIS, il quale non ha rappresentato solo uno strumento di visualizzazione dei risultati, ma, soprattutto, uno strumento di analisi ed elaborazione in grado di aggiornare in tempo reale le valutazioni ogni qualvolta nuovi dati ed informazioni siano rese disponibili.

1. Introduzione

Tra gli effetti collaterali che producono il maggior numero di danni in occasione di forti terremoti le frane rivestono un ruolo predominante rispetto ad altre tipologie quali la liquefazione o gli stessi tsunami, sia per frequenza di occorrenza che per il carattere, sovente, di impredicibilità di tali fenomeni. In questo senso, lo sviluppo di metodologie e la stima di scenari di pericolosità da frane sismoindotte rappresenta un valido strumento di ausilio per la formulazione di piani di emergenza delle operazioni civili, nonché un'avvincente sfida sotto l'aspetto scientifico. In passato si annoverano diversi tentativi di stimare la risposta dei pendii nei confronti delle azioni sismiche (Del Gaudio et al., 2003; Jibson et al., 2000; McCalpin, 1997; Miles et al., 2000; Wieczorek et al., 1985), gli ultimi dei quali, in senso cronologico, si avvalgono delle potenzialità offerte dai moderni strumenti GIS per il trattamento dei dati spaziali. Il presente studio illustra una metodologia in ambiente GIS (ArcInfoTM, platform) per formulare scenari di instabilità dei versanti a seguito di azioni sismiche stimate con metodologie probabilistiche e deterministiche. Le prime, includendo la variabile temporale della ricorrenza delle azioni, hanno la potenzialità di fornire un quadro della suscettività al dissesto del territorio a seguito di forti terremoti che ben si presta per politiche di pianificazione e sviluppo; le seconde, guardando alle azioni più severe (ma per questo meno frequenti) attese in un certo areale, rappresenta il limite superiore di taratura delle risorse e delle operazioni di protezione civile da attivare nelle fasi di emergenza per portare aiuto alla popolazione e al territorio colpiti. La metodologia adottata nel presente studio è illustrata in Figura 1.



Figura 1. Diagramma di flusso della metodologia adottata nel presente studio.

Flow-chart of the methodology implemented in the present study.

2. Case-study

Al fine di illustrare nel dettaglio la metodologia, viene mostrata un'applicazione condotta in Italia centrale, nell'area di Petriano in comune di Urbino. In Figura 2 è mostrata la carta litotecnica derivata dalla carta geologica in scala 1:10.000, con indicate le principali caratteristiche geotecniche utilizzate nelle analisi di stabilità.

La Figura 3 mostra l'inventario dei fenomeni franosi censiti nell'area e per le quali sono state effettuate le analisi di suscettività alla mobilizzazione sotto sisma appresso illustrate. Dette analisi sono state effettuate anche per le aree al di fuori dei corpi di frana censiti (analisi areale per cella elementare di calcolo delle dimensioni di 10x10 m), non illustrate nella presente nota per ragioni di spazio. Le analisi di pericolosità sismica per l'area in esame sono state condotte con metodologia sia probabilistica sia deterministica, rappresentando lo scuotimento in temini di Intensità di Arias (in m/s). I risultati sono mostrati in Figura 4, dove, nell'immagine in alto, sono mostrati i valori dell'intensità di Arias attesi con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, mentre nella figura in basso i valori calcolati con riferimento alla sorgente sismica più gravosa per l'area in esame, costituita da una faglia (la Fano-Ardizio) sita a circa 10 km di distanza dall'area e con un potenziale massimo di M6.1 (figura a destra). Dall'esame comparato delle due rappresentazioni della pericolosità si nota il diverso andamento dei valori spaziali delle intensità di Arias attese; mentre infatti i valori probabilistici aumentano verso SW, risentendo in maniera maggiore della sismicità appenninica, quelli deterministici aumentano verso NE, ossia in direzione della struttura sismogenetica. Per ogni singolo corpo di frana, sono stati quindi calcolati i valori delle accelerazioni critiche necessarie a determinare una condizione di equilibrio limite ($a_c | F_s=1$; Figura 5). Dati poi per ogni pendio i valori di Intensità di Arias derivati dalle analisi di pericolosità, sono stati calcolati gli spostamenti cosismici attesi ($D(a_c, I_A)$; Newmark, 1965) secondo un modello di analisi messo a punto da Jibson (1993) ed i cui coefficienti per la sismicità italiana sono stati ricavati da Romeo (2000).



Figura 2. Carta litotecnica e principali caratteristiche geotecniche utilizzate per le analisi di stabilità. *Lithotechnical map and geotechnical characteristics used in the slope stability analyses*.



Figura 3. Carta inventario dei movimenti franosi. *Landslides inventory map.*

Risultati e conclusioni.

I risultati sono espressi sia come frequenze annuali di eccedenza di un valore critico di spostamento ($D_n=10$ cm), assunto come rappresentativo di un indice di comportamento del pendio per condizioni di collasso incipiente, sia come valori di spostamento date le azioni attese in termini sia probabilistici che deterministici (Figura 6).

Le relative rappresentazioni della pericolosità da frana

sismoindotta sono mostrate in Figura 7, a sinistra come tempi di ritorno (l'inverso delle frequenze annuali di eccedenza) dei valori di spostamento critico, a destra come valori assoluti dello spostamento calcolato sotto le azioni di riferimento. Nella figura 8 sono infine mostrati i risultati delle analisi relative allo scenario deterministico (massimo terremoto atteso), con le azioni calcolate al 50° e all'84° percentile della distribuzione, ossia i cui effetti (in termini di postamento) hanno, rispettivamente, il 50% ed il 16% di probabilità di essere raggiunti o superati.



Figura 4. Risultati delle analisi di pericolosità sismica. In alto a sin., carta di scuotibilità in termini di intensità di Arias con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni. In basso a sin., carta di scuotibilità per la sorgente sismogenetica Fano-Ardizio. A destra, modello sismogenetico e sismotettonico di riferimento.

Results of the seismic hazard analysis. Top-left, Arias intensity values expected to be exceeded with a 10& chance in 50 years. Bottomleft, Arias intensity values due to an M6.1 earthquake occurring on the Fano-Ardizio fault, 10 Km far from the studied area. Right, seismotectonic and seismic source model.



Figura 5. Schema delle analisi di stabilità in condizioni dinamiche. *Scheme of the dynamic slope stability analyses.*



Figura 6. Diagramma di flusso per la formulazione degli scenari di pericolosità.

Flow-chart displaying the elicitation of the landslide scenarios.

Per questi ultimi è stata inoltre effettuata un'analisi preliminare delle condizioni di rischio indotte nelle principali infrastrutture e lifelines dell'area, attraverso il confronto tra le aree risultanti dal collasso dei versanti e la presenza di elementi esposti ($R=P\cap E$).

Lo studio ha messo in luce le potenzialità di un approccio integrato deterministico e probabilistico ai fini della determinazione degli scenari da pericolosità da frana indotti dalle azioni sismiche dovute ai terremoti. L'approccio probabilistico si presenta come un valido strumento previsionale nel medio-lungo periodo, utile pertanto ai fini della pianificazione dello sviluppo del territorio; l'approccio deterministico, d'altro canto, guardando alle azioni di più gravose attese, rappresenta lo strumento per il dimensionamento delle risorse necessarie in caso di emergenza post-sisma. Infine, va sottolineata l'importanza e l'oramai insostituibilità degli strumenti GIS, non soltanto come mezzi di archiviazione e rappresentazione di dati spaziali georeferenziati, ma, e diremmo soprattutto, per le capacità di analisi tra i diversi livelli di informazione disponibili.



Figura 7. Frequenze annuali di eccedenza per il superamento dello spostamento critico di 10 cm (sinistra) e valori dello spostamento cosismico attesi con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (destra). Annual frequency of exceedance of the 10 cm critical displacement (left), and coseismic displacements expected to be exceeded with a

Annual frequency of exceedance of the 10 cm critical alsplacement (left), and coseismic alsplacements expected to be exceeded with a 10% chance in 50 years (right).



Figura 8. Risultati delle analisi di rischio per il 50% (sinistra) e il 16% (destra) di livello di probabilità di essere raggiunti o superati. Results of landslide risk analyses showing the 50% (left) and 16% (right) of the confidence level to be exceeded.

Bibliografia.

Del Gaudio, V., Pierri, P., Wasowski, J., 2003. An Approach to Time-Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Landslide Hazard. Bulletin of the Seismological Society of America 93(2), 557-569.

Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Engineering Geology 58(3-4), 271-289.

McCalpin, J.P., 1997. An improved procedure for mapping earthquake-induced landslide potential using a geographic information system, with applications to the Puget Sound region. U.S. Geological Survey Technical Report, 53 pp.

Miles, S.B., Keefer, D.K., Nyerges, T.L., 2000, A case study in GIS-based environmental model validation using earthquake-induced landslide hazard. In Heuvelink and Lemmens eds., 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Amsterdam, Delft University Press, 481-493.

Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique 15(2), 139-159.

Jibson, R.W., 1993. Predicting earthquake-

induced landslide displacement using Newmark's sliding block analysis. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., TR record 1411, 9-17.

Romeo, R.W., 2000. Seismically induced landslide displacements: a predictive model. Engineering Geology 58(3-4), 337-351.

Wieczorek, G.F., Wilson, R.C., Harp, E.L., 1985. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County California. US Geol. Surv. Misc. Invest. Map I-1257-E, scale 1:62,500.