

ANALISI NUMERICA DEL COMPORTAMENTO NON LINEARE DI UN EDIFICIO IN MURATURA SOGGETTO A SPOSTAMENTI INDOTTI DA UNA FRANA A CINEMATICA LENTA

Gianfranco Nicodemo, Settimio Ferlisi, Dario Peduto
Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno
e-mail: gnicodemo@unisa.it, sferlisi@unisa.it, dpeduto@unisa.it

Luigi Borrelli, Luigi Aceto, Giovanni Gullà
*Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI),
sede di Cosenza*
e-mail: luigi.borrelli@irpi.cnr.it, luigi.aceto@irpi.cnr.it, giovanni.gulla@irpi.cnr.it

Sommario

Il presente contributo mostra i risultati preliminari di un'analisi numerica volta ad indagare la risposta – in termini di insorgenza e sviluppo del danno – di un edificio in muratura con fondazioni superficiali affetto da una frana a cinematica lenta in terreni alterati a struttura complessa. L'analisi, eseguita con l'ausilio di un codice di calcolo che implementa il metodo dell'Equivalent Frame (EF), si è avvalsa di dati di spostamento acquisiti mediante tecniche di monitoraggio sia convenzionali (da terra) sia innovative (di telerilevamento). La bontà dei risultati ottenuti, testimoniata dalla corrispondenza della risposta dell'edificio modellato con i dati sul danno acquisiti mediante rilievi multi-temporali in sito, invita alla definizione di modelli "edificio-frana" rappresentativi da utilizzare in attività finalizzate all'individuazione di strategie di intervento per la salvaguardia del patrimonio edilizio nelle aree urbane sede di frane a cinematica lenta.

1. INTRODUZIONE

Le frane a cinematica lenta che interessano i centri abitati sono spesso responsabili dell'insorgenza e dello sviluppo del danno alle strutture esposte (ad esempio, edifici) la cui funzionalità, se non anche la stabilità, può risultrne seriamente compromessa con ovvie ricadute sia sociali che economiche. A tal riguardo, la disponibilità di strumenti affidabili di previsione del danno (Peduto et al., 2017) – ad esempio, generati su base empirica grazie ai dati raccolti mediante rilievi in sito (Ferlisi et al., 2015; Palmisano et al., 2018) – può rivelarsi utile nei processi decisionali applicabili a grande scala (comunale) e, se necessario, nella scelta dei più idonei interventi di mitigazione sia strutturali sia non strutturali (Ferlisi et al., 2019). D'altra parte, il ricorso ad analisi numeriche da condurre a scala di dettaglio su singoli edifici soggetti a cedimenti in fondazione indotti da frane a cinematica lenta (Nicodemo et al., 2020; Sangirardi et al., 2020) appare necessario laddove si debba enucleare il ruolo svolto da diversi fattori (ad esempio, geometria, distribuzione dei carichi, proprietà meccaniche) sul raggiungimento di un certo livello di severità del danno così da procedere correttamente ad una progettazione degli interventi basata sul controllo degli spostamenti (Ferlisi et al., 2019).

La presente comunicazione illustra i risultati di un'analisi numerica volta ad indagare gli effetti – in termini di insorgenza e sviluppo del danno alla sovrastruttura di un edificio in muratura – dovuti al verificarsi di cedimenti indotti da una frana a cinematica lenta (Gulla et al., 2017). L'analisi è stata condotta mediante l'applicazione del metodo dell'Equivalent Frame (EF) (Lagomarsino et al., 2013) su un edificio situato nel centro storico del Comune di Lungro (Provincia di Cosenza, Regione Calabria) la cui area urbana è diffusamente interessata da frane a cinematica che hanno causato danni a strutture/infrastrutture con esse interagenti (Peduto et al., 2017).

2. CASO DI STUDIO E DATI DISPONIBILI

Il centro storico del Comune di Lungro è caratterizzato dalla presenza di numerosi edifici in muratura (prevalentemente di due-tre piani con muratura portate principalmente di ciottoli e/o pietrame) con fondazioni superficiali poggianti all'interno o sul contorno di corpi di frana attivi a cinematica lenta (Fig. 1a). Per ciascuno degli edifici presenti nell'area, sono disponibili dati raccolti mediante rilievi multi-temporali utilizzando schede predisposte ad hoc (Ferlisi et al. 2015; Peduto et al. 2018). Tali dati concorrono alla definizione dello stato di manutenzione degli edifici rilevati e dell'associato livello di severità del danno (Fig. 1a) stabilito sulla base di una classificazione che adatta quella proposta da Burland et al. (1977). Ai fini dell'analisi numerica, tra gli edifici rilevati se ne è selezionato uno in muratura che – durante l'ultimo rilievo effettuato nel luglio 2020 – presentava un livello di severità del danno classificato come molto grave (D5) (Figura 1a, b). L'edificio è fondato su terreni detritico-colluviali di versante dello spessore dell'ordine dei 5 metri che a loro volta giacciono su filladi degradate ed alterate con aspetto caotico. Tali terreni costituiscono il corpo di una frana a cinematica lenta di tipo scorrimento roto-traslazionale attiva caratterizzata sulla base di criteri geologici e geomorfologici, dati di monitoraggio e dettagliati rilievi multi-temporali in sito (Fig. 1a).

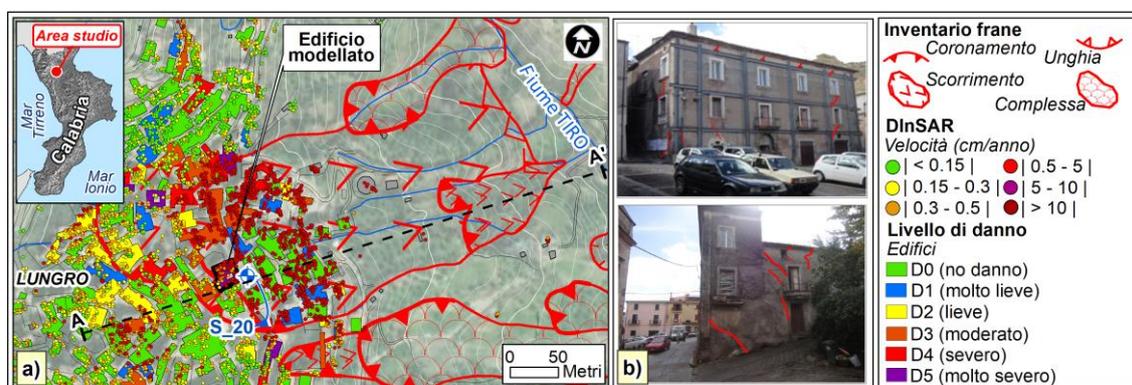


Fig 1. a) Inventario dei fenomeni franosi che interessano il centro storico del comune di Lungro (Provincia di Cosenza, Regione Calabria) con distribuzione dei livelli di severità del danno registrato agli edifici, dati di monitoraggio superficiale (DInSAR) acquisiti su orbita ascendente dal sensore Cosmo-SkyMed (periodo ottobre 2012 – aprile 2014) e localizzazione del foro di sondaggio condizionato con inclinometro (S_20) in prossimità della facciata principale dell'edificio in muratura selezionato per la modellazione e mostrato in b).

I dati di monitoraggio disponibili per l'area di studio includono spostamenti superficiali e profondi (Fig. 1c) acquisiti, rispettivamente, mediante tecniche innovative di processamento – basate sull'interferometria differenziale – di immagini acquisite da radar ad apertura sintetica montati su piattaforme satellitari (DInSAR) e un inclinometro installato nel foro di sondaggio S_20 posto in prossimità della facciata principale dell'edificio selezionato (Fig. 1a e 2a).

I dati DInSAR derivano da immagini COSMO-SkyMed acquisite in orbita ascendente (da ottobre 2012 ad aprile 2014) e restituiscono valori di velocità associati a pixel coerenti la cui distribuzione spaziale è mostrata in Fig. 1c. D'altro canto, i risultati derivanti dall'elaborazione delle misure all'inclinometro S_20 – raccolte da aprile 2006 a luglio 2019 – hanno evidenziato la presenza di spostamenti superficiali principalmente orientati nella direzione nord-est e di due superfici di scorrimento che raggiungono profondità massime rispettivamente pari a circa 15 m e 25 m a partire dal piano campagna (Fig. 2a e 2b). Lungo la stessa verticale S_20, i geo-materiali attraversati sono stati raggruppati in due classi principali (Fig. 2a) aventi simile distribuzione granulometrica (Fig. 2c): terreni colluviali (COV) che si estendono fino a profondità di circa 15,5 m dal piano campagna; filladi degradate (CHAOT) le cui profondità variano da 15,5 m a 66 m (profondità di fondo foro). Inoltre, si sono eseguite prove triassiali consolidate-drenate su provini ottenuti da campioni indisturbati di terreno COV interagente con la fondazione dell'edificio al fine di determinare i valori dei parametri meccanici (quali i moduli di deformabilità) i cui valori medi sono riassunti nella tabella riportata in

Fig. 2d unitamente al valore del modulo di Young equivalente (E_{eq}) utilizzato nelle analisi numeriche.

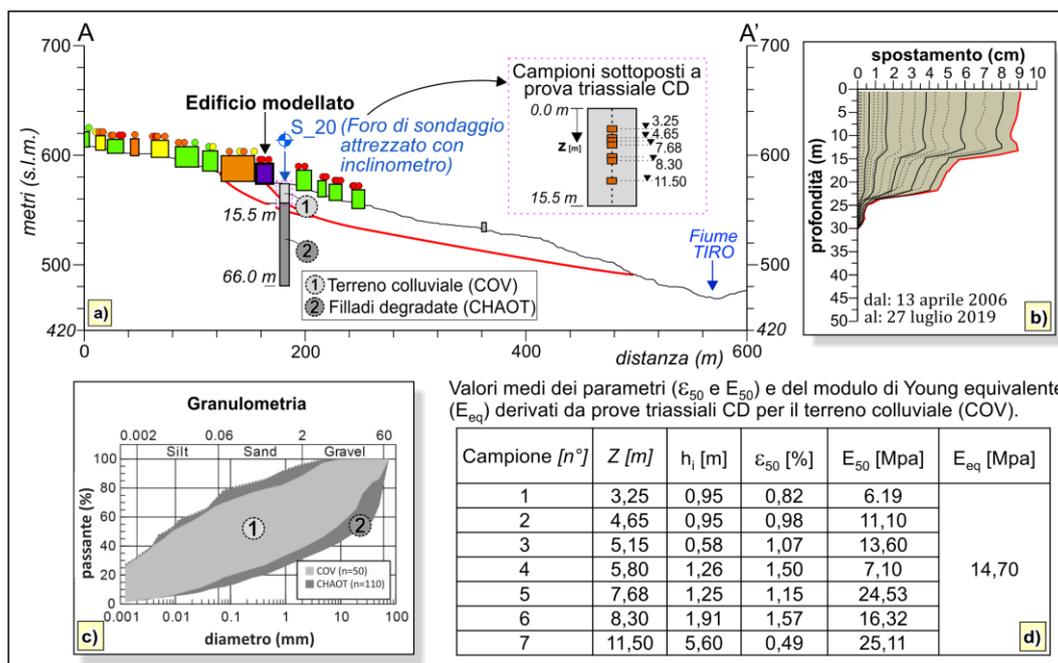


Fig 2. a) Sezione longitudinale lungo il profilo A–A' (riportato in Fig. 1a) con indicazione delle superfici di scorrimento rilevate dall'inclinometro S_20 e profondità di prelievo dei campioni di terreno COV; b) misure di spostamento registrate all'inclinometro S_20 nel periodo di osservazione (aprile 2006 a luglio 2019); c) distribuzione granulometrica dei terreni COV e CHAOT identificati lungo il foro di sondaggio S_20; d) valori medi dei parametri elastici derivanti da prove triassiali consolidate-drenate (CD) eseguite sul terreno COV interagente con la fondazione dell'edificio selezionato.

3. MODELLO DI EDIFICIO

L'edificio in muratura selezionato (Fig. 1b) è stato modellato utilizzando la versione accademica del software TREMURI che consente di simulare il comportamento globale e non lineare di pareti in muratura aventi assegnate proprietà fisico-meccaniche sulla base del metodo EF (Lagomarsino et al., 2013). L'edificio, di altezza massima pari a 10,4 m, presenta una geometria articolata (Fig. 3a) che comporta la trasmissione di carichi asimmetrici al terreno tramite la fondazione superficiale. La struttura contempla tre piani principali (per un'altezza totale di 8,6 m) ed un piano rialzato (di altezza pari a 1,8 m) situato nella porzione occidentale della facciata principale (P1). Le murature esterne ed interne presentano spessori variabili dai 50 cm ai 100 cm e sono direttamente connesse alla fondazione la cui dimensione in pianta è pari a 25,7 m × 15,7 m (Fig. 3a), rispettivamente nella direzione x e y.

I solai sono stati modellati come membrane (spessore 5 cm) a comportamento elastico-lineare con elementi di rinforzo costituiti da catene poste ad ogni livello al fine di simulare la presenza degli elementi di acciaio (Fig. 1b) adottati quale intervento di rinforzo. Le pareti in muratura sono schematizzate nel metodo EF come telai idealizzati i cui elementi deformabili (ovvero elementi maschi ed elementi fasce, Fig. 3b) sono collegati tra loro da nodi rigidi e possono manifestare una modalità di rottura per flessione o per taglio. Nelle simulazioni numeriche sono stati adottati i valori medi dei parametri fisico-meccanici riferiti a edifici in muratura esistenti (NTC 2008), insieme ai valori previsti per i parametri relativi ai solai e ai tiranti in acciaio (Fig. 3a).

Per quanto riguarda il modello di interazione terreno-fondazione, si sono posizionate delle molle a comportamento lineare in corrispondenza dei nodi alla base del modello di telaio equivalente generato dal software TREMURI (Fig. 3b). Le corrispondenti rigidità – nelle direzioni verticale (K_z) ed orizzontale (K_x , K_y) – sono state stimate in accordo con quanto proposto da Gazetas (1991) (Fig. 3d).

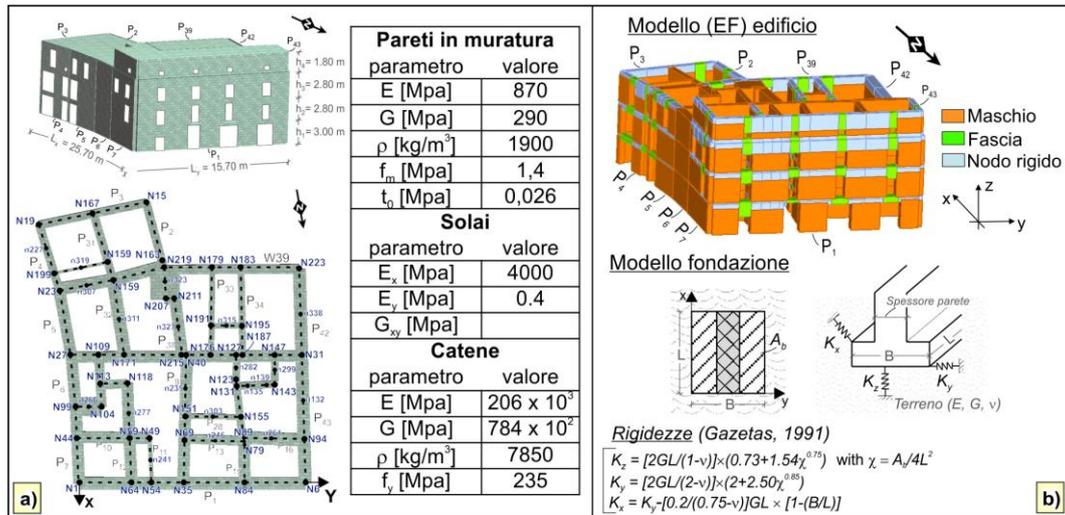


Fig 3. a) Vista 3D del modello di edificio in muratura (Fig. 1b) con layout del piano di fondazione, nodi di calcolo e parametri fisico-meccanici adottati nelle analisi numeriche; b) schematizzazione delle pareti esterne dell'edificio per come ottenuta dall'impiego dell'Equivalent Frame (EF) (Lagomarsino et al., 2013) e modello di interazione terreno-fondazione con rigidzza delle molle stimata in accordo con Gazetas (1991) sulla base dei parametri elastici pertinenti al tipo di terreno interagente e dell'area di influenza della fondazione.

4. ANALISI NUMERICA E RISULTATI

L'analisi numerica svolta sul modello dell'edificio selezionato ha previsto, in una prima fase, l'applicazione del peso proprio degli elementi strutturali costituenti da cui è scaturita la corrispondente distribuzione delle forze agenti in corrispondenza dei nodi in fondazione (Fig. 3a e 3b). Successivamente, dopo l'azzeramento dei cedimenti dovuti all'applicazione del peso proprio (Ferlisi et al., 2020), in corrispondenza dei citati nodi in fondazione si è imposto un pattern di spostamenti conforme alla deformazione sperimentata dall'edificio reale come conseguenza della sua interazione con la frana a cinematica lenta (Fig. 1a). Il pattern di spostamenti da imporre è stato ottenuto combinando le informazioni – in termini di componenti dello spostamento nella direzione verticale e orizzontale – desumibili dai dati di monitoraggio acquisiti mediante tecniche innovative (DInSAR) e convenzionali (inclinometro). In particolare, sulla base dei valori di velocità nella direzione verticale pertinenti ai pixel coerenti ricadenti sul tetto dell'edificio e ottenuti grazie all'impiego della tecnica DInSAR (V_z , Fig. 4a), si sono calcolati i corrispondenti valori dei cedimenti (δz , Fig. 4b) considerando un periodo temporale di un anno (Nicodemo et al. 2020); a loro volta, tali cedimenti sono stati interpolati per risalire a quelli da imporre a ciascun nodo in fondazione (Fig. 4c). D'altra parte, i dati inclinometrici sono stati utilizzati per desumere la direzione dei vettori di spostamento nel piano orizzontale rispetto al sistema di riferimento (x, y) (Fig. 4b). Si è, quindi, proceduto con le simulazioni numeriche imponendo che gli spostamenti nodali aumentassero omoteticamente di valore secondo il pattern di spostamenti in precedenza ottenuto (Fig. 4d). In particolare, l'insorgenza e lo sviluppo del danno in ciascun elemento strutturale si fa corrispondere al raggiungimento di una determinata modalità di comportamento plastico o a rottura nei maschi murari o nelle fasce di piano che compongono le pareti dell'edificio modello (Fig. 5). Di seguito, i risultati ottenuti sono stati confrontati con la distribuzione spaziale delle lesioni visibili sulle facciate dell'edificio reale, per come registrate nel corso dei rilievi multi-temporali in sito. A tal riguardo, in Figura 5 si mostrano quattro scenari di danno – corrispondenti a quattro rilievi del danno effettuati tra il 2005 e il 2020 – che si sono simulati eseguendo un'analisi numerica a spostamento controllato che prevedeva il raggiungimento di assegnati valori del cedimento differenziale (Δ) in fondazione (uno per ciascun scenario di danno).

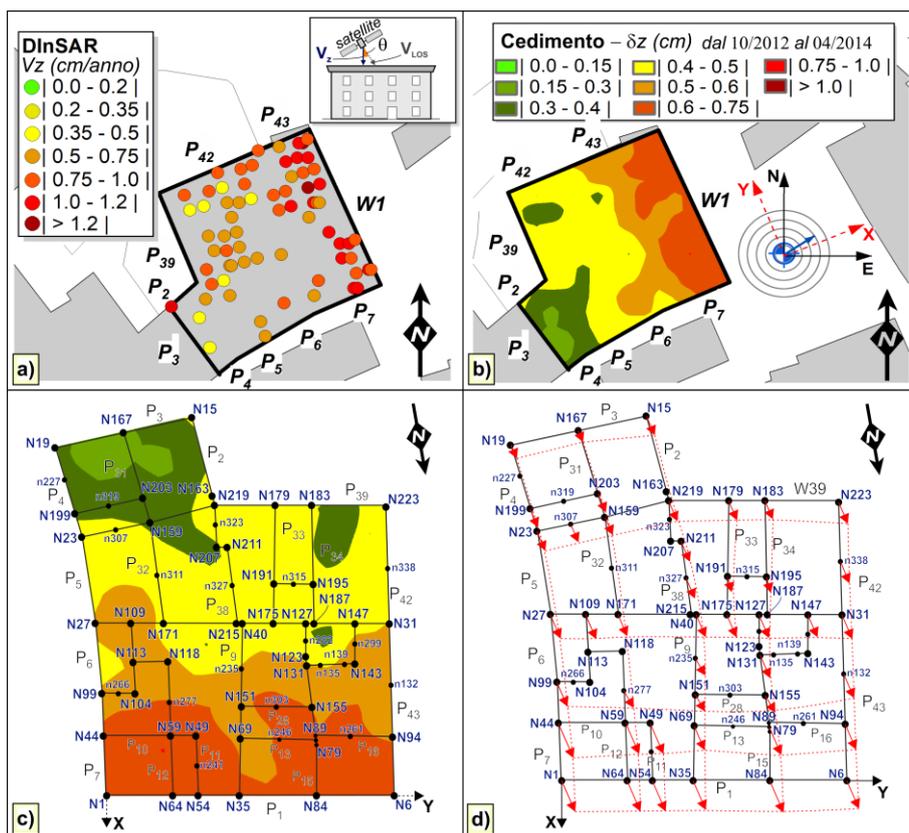


Fig 4. a) Velocità verticale media annua (V_z) e b) andamento dei cedimenti (δz) ottenuti utilizzando i dati DInSAR unitamente alle componenti di spostamento orizzontale (δx e δy) desunte dalle misure all'inclinometro S_20; c) pattern di cedimenti (δz) sovrapposto e d) schema esemplificativo degli spostamenti imposti ai nodi in fondazione.

I risultati ottenuti con l'analisi numerica mostrano come gli scenari di danno simulati (Fig. 5) con riferimento alla facciata principale (P1) e a quella laterale (P43) ben riproducono il danno visibilmente registrato; si osserva, infatti, una buona corrispondenza tra le modalità di rottura dei maschi e delle fasce che compongono le facciate dell'edificio modello e la distribuzioni "reale" delle lesioni.

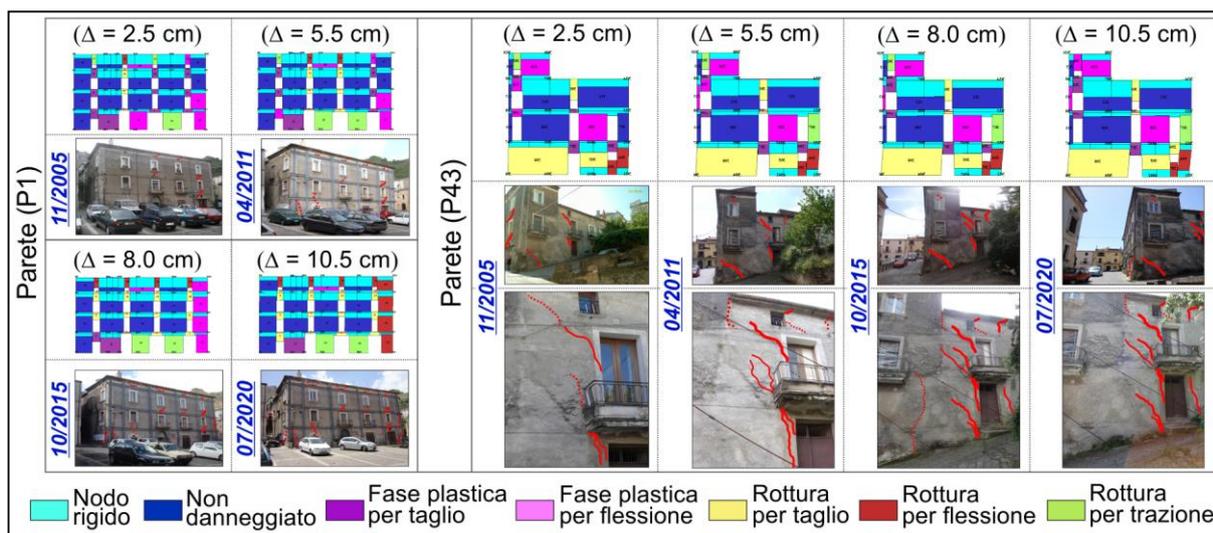


Fig 5. Risultati della simulazione numerica in termini di insorgenza e sviluppo del danno negli elementi strutturali (maschi e fasce) della parete principale (P1) e di quella laterale (P43) dell'edificio modello come esito degli spostamenti imposti ai nodi in fondazione e loro confronto con la distribuzione spaziale delle lesioni per come registrata nel corso dei rilievi multi-temporali in sito.

5. CONCLUSIONI

Nella presente comunicazione si sono presentati i risultati di un'analisi numerica volta a simulare la risposta di un edificio in muratura a spostamenti indotti in fondazione da una frana a cinematica lenta. Su tale edificio, ricadente nell'area urbana di Lungro (Provincia di Cosenza, Regione Calabria) e avente caratteristiche geometriche e meccaniche note, si è applicato il metodo EF grazie alla disponibilità di dati di monitoraggio raccolti mediante tecniche convenzionali e innovative che hanno permesso di ricostruire il pattern di spostamenti in fondazione da utilizzare come input nell'analisi numerica. La bontà del modello utilizzato nella simulazione dell'insorgenza e dello sviluppo del danno negli elementi strutturali (maschi e fasce) che costituiscono le facciate dell'edificio è testimoniata dalla buona corrispondenza dei risultati ottenuti con quanto registrato nel corso di rilievi eseguiti sull'edificio reale in quattro differenti intervalli temporali.

E' appena il caso di osservare che, ai fini di una corretta interpretazione del danno all'edificio reale, si renderebbero necessarie analisi numeriche più sofisticate volte a simulare il pattern di spostamenti del corpo di frana a cinematica lenta (in particolare, in corrispondenza del contatto fondazione-terreno) e la progressiva evoluzione spazio-temporale del danno. Tuttavia, considerati i risultati incoraggianti sin qui ottenuti, si ritiene che l'applicazione di quanto presentato a ulteriori casi reali possa condurre alla definizione di modelli "edificio-frana" rappresentativi da considerare in analisi mirate alla previsione (della evoluzione del livello di severità) del danno e/o alla salvaguardia del patrimonio edilizio mediante interventi di mitigazione sostenibili.

Bibliografia

- Burland J.B., Broms B.B., de Mello V.F.B. (1977). "Behaviour of foundations and structures. Proc. of the 9th international conference on soil mechanics and foundation engineering", *SOA report*, vol 2, 495–546.
- Ferlisi S., Gullà G., Nicodemo G., Peduto D. (2019). "A multi-scale methodological approach for slow-moving landslide risk mitigation in urban areas, southern Italy", *Euro-Mediterr. J. Environ. Integr.*, 4 (20), <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0110-4>.
- Ferlisi S., Nicodemo G., Peduto D., Negulescu C., Grandjean G. (2020). "Deterministic and probabilistic analyses of the 3D response of masonry buildings to imposed settlement troughs", *Georisk*, 14 (4), 260–279.
- Ferlisi S., Peduto D., Gullà G., Nicodemo G., Borrelli L., Fornaro G. (2015). "The use of DInSAR data for the analysis of building damage induced by slow-moving landslides", *Proc. of Eng. Geol. for Soc. and Terr.*, Springer, Cham, vol 2, 1835–1839.
- Gazetas G. (1991). "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations", *J. Geotech. Eng.*, 117 (9), 1363–1381.
- Gullà G., Peduto D., Borrelli L., Antronico L., Fornaro G. (2017). "Geometric and kinematic characterization of landslides affecting urban areas: the Lungro case study (Calabria, southern Italy)", *Landslides*, 14:171–188.
- Lagomarsino S., Penna A., Galasco A., Cattari S. (2013). "TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings", *Engineering Structures*, 56, 1787–1799.
- Nicodemo G., Ferlisi S., Peduto D., Aceto L., Gullà G. (2020). "Damage to masonry buildings interacting with slow-moving landslides: a numerical analysis", *Proc. of the VII Italian Conf. of Researchers in Geotech. Eng.*, © Springer Nature Switzerland AG 2020, LNCE 40, 52–61, https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_6.
- N.T.C. (2008). "Norme tecniche per le costruzioni (Decreto Ministeriale 14/1/2008)", *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*. G.U. S.O. n. 30 del 4/2/2008.
- Palmisano F., Vitone C., Cotecchia F. (2018). "Assessment of landslide damage to buildings at the urban scale", *ASCE J. Perform. Constr. Facil.*, 32(4):04018055.
- Peduto D., Ferlisi S., Nicodemo G., Reale D., Pisciotta G., Gullà G. (2017). "Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales", *Landslides*, 14 (6), 1993–2007.
- Sangirardi M., Amorosi A., de Felice G. (2020). "A coupled structural and geotechnical assessment of the effects of a landslide on an ancient monastery in Central Italy", *Engineering Structures*, 225:111249, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111249>.