

LA VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA STRUTTURALE NON LINEARE ATTRAVERSO LA TECNICA DELLA REGRESSIONE PESATA IN BASE ALLA DISAGGREGAZIONE DELLA PERICOLOSITA'

L. Elefante, F. Jalayer, I. Iervolino, G. Manfredi

Dipartimento di ingegneria strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II.

La selezione dell'input sismico rappresenta uno degli aspetti fondamentali con cui l'ingegnere si deve confrontare nella valutazione della risposta sismica di una struttura mediante analisi numeriche di tipo dinamico. Si considera buona regola, nella scelta dell'input sismico da utilizzare, selezionare accelerogrammi le cui magnitudo, distanze, condizioni di sito e meccanismi di faglia siano rappresentativi del sito relativo alla struttura in esame. Tale scelta può essere guidata dalla disaggregazione della pericolosità sismica (Bazzurro e Cornell, 1999) per il sito di interesse. Tuttavia, una volta scelto il set di accelerogrammi, esistono diverse tecniche per poi valutare la risposta sismica strutturale.

In questo lavoro si mostra come i risultati della disaggregazione della pericolosità possano essere utilizzati per assegnare dei pesi agli accelerogrammi selezionati in relazione alle caratteristiche di ciascuno in termini di magnitudo, distanza e deviazione dalla legge di attenuazione di riferimento (epsilon - ϵ). Pesare gli effetti di ciascun accelerogramma, in termini di frequenza annuale di superamento di un parametro di domanda espresso in termini di spostamento (es., rotazione massima di interpiano, θ_{max}), può consentire di ottenere una accurata stima della risposta strutturale con un numero limitato di analisi.

In base ad un criterio prestazionale di tipo probabilistico, la valutazione sismica di una struttura esistente può essere espressa con la formula:

$$\lambda_{DM} \leq P_o \quad \text{Eq.1}$$

dove λ_{DM} rappresenta la frequenza media annuale di superamento di uno specifico livello di danneggiamento e P_o è la soglia di probabilità ammissibile per la valutazione. Per calcolare λ_{DM} attraverso analisi dinamiche non lineari e' utile introdurre un parametro del moto al suolo, definito misura di intensità (IM) (es., la accelerazione di picco (PGA) o quella spettrale al primo modo della struttura), che serve a mettere in relazione le caratteristiche dell'accelerogramma con la risposta strutturale. Tra le caratteristiche desiderabili della IM c'è sicuramente la *sufficienza*, per cui, la prestazione strutturale, dato un valore arbitrario dell' IM è indipendente da ulteriori caratteristiche della registrazione come ad esempio la magnitudo e la distanza (Iervolino e Cornell, 2005). L'introduzione della IM consente, utilizzando il teorema delle probabilità totali (o regola di Bayes), di calcolare la frequenza media annuale di superamento di uno specifico stato limite scomponendola in termini più semplici e che rappresentano in qualche modo la probabilità della causa e dell'effetto sismico:

Eq.2

$$\lambda_{DM}(y) = \int P_{DM|IM}(DM > y | x) |d\lambda_{IM}(x)|$$

Il primo termine all'interno dell' integrale, $P_{DM|IM}(DM > y/x)$ è la probabilità condizionata di superare la soglia di danneggiamento y per un dato valore di $IM=x$: tale termine è noto come *fragilità* strutturale e può essere stimata mediante analisi dinamiche non lineari. Il secondo termine può essere ottenuto mediante un'analisi probabilistica della pericolosità sismica relativa al sito in esame (PSHA, McGuire, 2004).

Nel lavoro presentato si sono analizzate due procedure alternative per l'analisi dinamica non lineare: (1) il metodo *cloud* e il metodo (2) *stripes* (Jalayer 2003, Baker

e Cornell 2005). Il metodo (1) applica le tecniche di regressione lineare ai risultati ottenuti dalle analisi dinamiche non lineari, eseguite con accelerogrammi non scalati, al fine di stimare la media condizionata e la deviazione standard di DM dato IM . Assumendo che i residui della regressione lineare siano indipendenti ed identicamente distribuiti (i.i.d.), è possibile valutare $P_{DM|IM}(DM > y/x)$. Il metodo (2), invece, utilizza i risultati ottenuti da analisi dinamiche non lineari eseguite con gli accelerogrammi scalati a livelli via via crescenti di IM . Le proprietà statistiche dei risultati delle analisi strutturali non lineari così ottenuti, possono essere calcolate per i diversi livelli di IM considerati ed essere utilizzate per valutare la probabilità di superamento di ciascun specifico livello di danno. Se l' IM adottata risulta sufficiente rispetto alle altre caratteristiche relative allo scuotimento al suolo, i metodi illustrati risultano efficienti e di semplice applicazione. In caso contrario, è necessario investigare in relazione a quale ulteriore parametro possa essere preso in considerazione al fine di migliorare i risultati. In altre parole, si deve cercare il parametro che, abbinato all' IM scelto in partenza, fornisca una nuova misura di intensità sufficiente. In tal caso, invece di considerare un IM di tipo scalare, può essere utile, dunque, adottarne uno di tipo vettoriale $IM=[IM_1, IM_2]$, caso in cui l'Eq.2 va riscritta nel modo seguente:

$$\lambda_{DM}(y) = \int \int P_{DM|IM_2, IM_1}(DM > y | x, z) p_{IM_2|IM_1}(z | x) \left| d\lambda_{IM_1}(x) \right| \quad \text{Eq.3}$$

Il primo termine dell'integrando rappresenta la probabilità condizionata di superamento di $DM=y$ dati $IM_1=x$ e $IM_2=z$; il secondo termine è la funzione densità di probabilità condizionata di IM_2 dato IM_1 . Anche in questo caso per ottenere valutazioni di tipo probabilistico, possono essere utilizzati il metodo cloud e quello stripes. Nel metodo cloud, al fine di stimare i parametri statistici della misura di danno condizionati ad IM_1 e IM_2 , viene utilizzata la tecnica della regressione multipla. Nel metodo stripes, invece, viene adoperata la tecnica di regressione lineare semplice per ciascun livello di IM_1 utilizzando IM_2 come variabile indipendente.

Tra la valutazione sismica effettuata mediante l'utilizzo di un IM di tipo scalare e quella con un IM di tipo vettoriale, si pone una tecnica intermedia, ibrida, che tiene conto della non sufficienza del parametro IM_1 , pesando i risultati delle analisi strutturali (cloud e stripes) in relazione alla probabilità di avere un certo valore di IM_2 dato IM_1 , calcolata mediante disaggregazione. La disaggregazione è una operazione che consente di valutare i contributi di diversi parametri relativi allo scuotimento al suolo alla pericolosità di un sito dato il livello dell' IM .

I risultati del metodo cloud vengono pesati in relazione alla probabilità di IM_2 dato IM_1 per ciascun accelerogramma attraverso la tecnica di regressione pesata. Le statistiche derivate dai risultati delle analisi stripes vengono invece calcolate attraverso il valore atteso, pesato sempre utilizzando la disaggregazione al fine di stimare la probabilità di IM_2 per ciascun livello di IM_1 .

Per valutare le tecniche descritte si è considerato come studio un edificio scolastico esistente in calcestruzzo armato situato nella città di Avellino, costruito negli anni sessanta e progettato per soli carichi verticali da cui è stato estratto il telaio centrale, adoperato poi nelle analisi come modello strutturale 2D (Fig. 1). La struttura è stata modellata a *plasticità concentrata* mediante il programma di calcolo OPENSEES (Scott and Fenves, 2006). Per le analisi sono stati selezionati 21 accelerogrammi relativi ad eventi della zona mediterranea, registrati su suolo di categoria B ($400 \text{ m/s} < V_{s30} < 700 \text{ m/s}$), con magnitudo e distanza dalla faglia comprese rispettivamente tra 5.3-7.2 e 7-30km. Le misure di intensità adoperate nel presente studio sono il picco di accelerazione (PGA) e l'accelerazione spettrale al primo periodo di vibrazione della

struttura ($S_d(T_I)$) accoppiate poi, in forma vettoriale, con altri parametri: in particolare PGA con la magnitudo (M) e $S_d(T_I)$ con ε della legge di attenuazione.

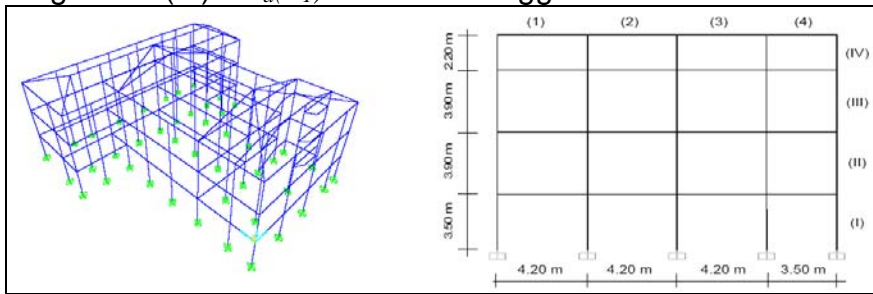


Fig. 1 – Vista 3D dell'edificio e telaio centrale scelto come caso di studio.

A titolo di esempio si riportano in Fig. 2 i risultati ottenuti dall'analisi strutturale dinamica, utilizzando il metodo cloud con PGA come misura di intensità originale ed il residual-residual plot relativo alla introduzione della magnitudo M come parametro aggiunto. Nella Fig. 3 sono riportati i risultati ottenuti con il metodo cloud e l'introduzione della magnitudo, utilizzando la regressione multipla e quella pesata. Sono di seguito riportate le curve di pericolosità ottenute con il metodo cloud e stripes: la linea sottile rappresenta la curva di pericolosità ottenuta considerando come parametro di intensità la sola PGA ; la linea più spessa si riferisce alle analisi relative al vettore $\mathbf{IM}=[PGA,M]$; la linea tratteggiata rappresenta la curva di pericolosità ottenuta utilizzando ancora PGA come misura di intensità, ma aggiustata in relazione alla dipendenza rispetto alla magnitudo, mediante l'utilizzo della regressione pesata.

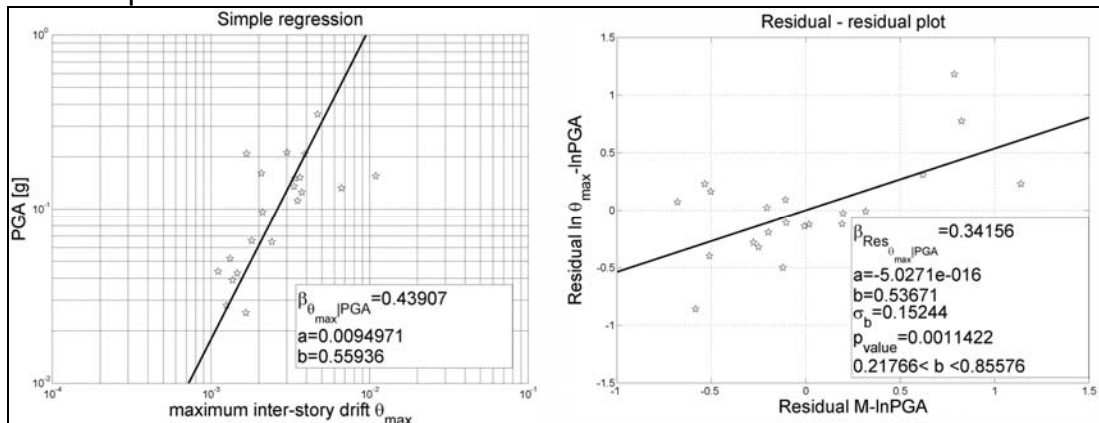


Fig. 2 – Risultati analisi strutturale metodo cloud e residual-residual plot θ_{max} - PGA - M .

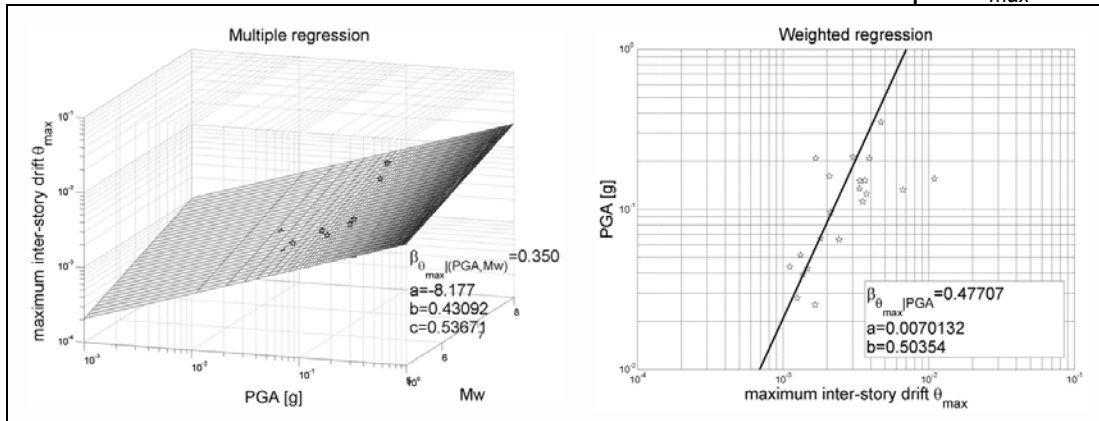


Fig. 3 – Risultati regressione multipla e regressione pesata.

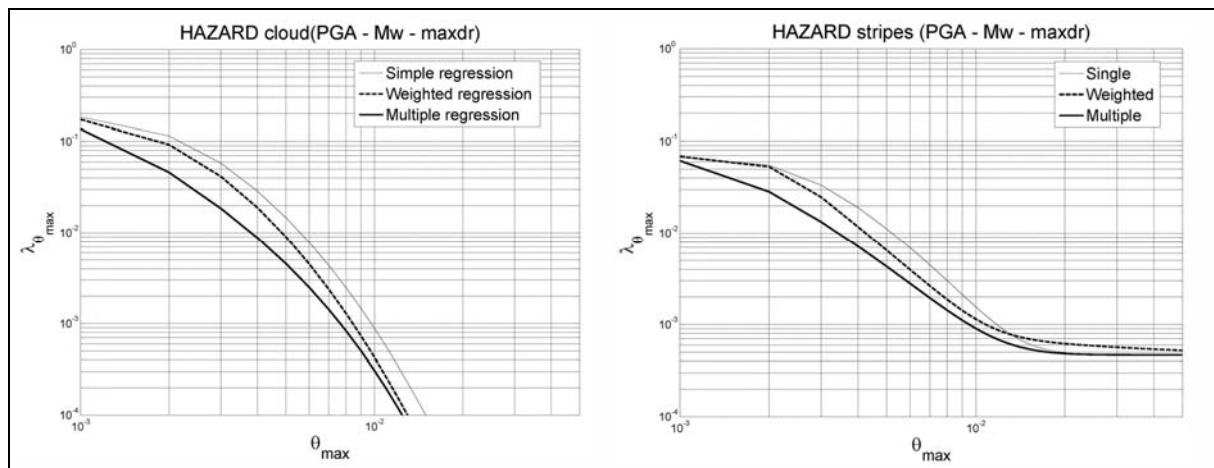


Fig. 4 – Curve di pericolosità relative al metodo cloud ed al metodo stripes.

Le curve di pericolosità relative alla massima rotazione di interpiano, stimate per la struttura analizzata mediante l'utilizzo della tecnica di regressione pesata risultano, sia nel caso cloud che in quello stripes, molto vicine alle curve ottenute adottando un parametro di intensità di tipo vettoriale. Può dunque concludersi che per la struttura in esame il metodo ibrido presentato migliora la stima della pericolosità, sia per i risultati dell'analisi cloud che per quelli dell'analisi stripes. Un'attenta selezione degli accelerogrammi può essere non necessaria se viene verificata la sufficienza del parametro di misura di intensità adottato; in caso contrario, possono quindi essere adottate tecniche ibride, basate sulla disaggregazione della pericolosità sismica, finalizzate a modificare i pesi relativi alle registrazioni accelerometriche e le corrispondenti risposte strutturali, in relazione alle dipendenze osservate.

BIBLIOGRAFIA.

- Jalayer F. *Direct Probabilistic Seismic Analysis: Implementing Non-linear Dynamic Assessments*, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford, CA, March 2003.
- Baker JW, Cornell CA. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34:1193-1217, 2005.
- Iervolino I., Cornell C.A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, 21(3):685-713.
- McGuire RK. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Earthquake Engineering Research Institute; First Edition, August 2004.
- Scott MH, GL Fenves. Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 132(2):244-252, February 2006.