

VALUTAZIONE EMPIRICA DELL'INFLUENZA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE SUL NON SINCRONISMO DEL MOTO IN SUPERFICIE

Giuseppe Tropeano, Francesco Silvestri
Università di Napoli "Federico II"

giuseppe.tropeano@unina.it, francesco.silvestri@unina.it

Sommario

Le attività riassunte in questo contributo sono svolte nell'ambito del progetto di ricerca PRIN 2008: "Effetto del non sincronismo inclusa la risposta sismica locale sulla sicurezza dei ponti", Linea 1 EQK. In tale ambito, gli Autori hanno analizzato gli effetti dell'asincronismo del moto sismico registrato da coppie di stazioni accelerometriche ubicate, a distanze dell'ordine delle centinaia di metri, su terreni con caratteristiche lito-stratigrafiche corrispondenti ad un sito di riferimento (sito R) e su sito con amplificazione stratigrafica (sito S) corrispondente nei diversi casi alle classi di sottosuolo B, C, D della Norma Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/1/2008). I risultati ottenuti da queste analisi preliminari mostrano che gli spostamenti differenziali valutati secondo le prescrizioni di normativa sono mediamente maggiori di quelli misurati sperimentalmente e che la formulazione analitica adottata dalla Norma è appropriata per descrivere la dipendenza di spostamenti relativi dall'accelerazione di riferimento.

Introduzione

Il non-sincronismo dell'azione sismica riveste un ruolo importante nello studio della risposta sismica di infrastrutture con significativo sviluppo longitudinale (ISO TC98/SC3 N 229, 2003), che interagiscono con il terreno in superficie (p.es. le dighe, cfr. Gazetas & Dakoulas, 1992) oppure in profondità (p.es. le gallerie, cfr. St. John & Zahrah, 1984). L'interazione può svilupparsi con continuità ad esempio per costruzioni in terra ed infrastrutture in sotterraneo, oppure localmente ad esempio in corrispondenza delle pile di viadotti a più campate e lungo un campo di profondità dipendente dal tipo e dalle dimensioni delle fondazioni.

Il fenomeno fisico dipende da due fattori principali:

- 1) variabilità del moto lungo lo sviluppo dell'infrastruttura, dovuta alla propagazione e all'incoerenza delle onde sismiche;
- 2) variabilità delle condizioni geomorfologiche e litologiche locali del sottosuolo.

Il secondo fattore determina la 'risposta sismica locale', che si traduce, nella maggior parte dei casi, in un'esaltazione degli effetti di non-sincronismo del moto in superficie. In particolare, nell'analisi sismica dei viadotti, è necessario definire l'input sismico di ciascuna pila. Tale operazione può risultare particolarmente onerosa principalmente a causa degli effetti legati alla geomorfologia del sito la cui risposta necessita di una modellazione che può divenire particolarmente complessa. Da qui la necessità di definire procedure che tengano conto in maniera semplificata di tutti gli aspetti citati e che forniscano risultati in termini di spostamenti differenziali sufficientemente cautelativi.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC 2008 (D.M. 14/1/2008), introducono la necessità di valutare tali effetti in termini di massimo spostamento relativo tra due punti, attraverso una relazione derivata dalla soluzione di un modello analitico di propagazione delle onde sismiche (Nutti & Vanzi, 2005). Obiettivo di questo studio è verificare la procedura proposta dalle NTC

2008, attraverso il confronto con valori di spostamento relativo derivanti da registrazioni accelerometriche di eventi sismici che includono implicitamente gli effetti sopra citati.

Selezione delle registrazioni

Gli accelerogrammi utilizzati in questo studio sono stati selezionati dai database sismici nazionali SISMA (Scasserra et al., 2008) e ITACA (Working Group ITACA, 2010). In dettaglio sono state ricercate quelle coppie di registrazioni che possano essere definite come ‘empiricamente correlabili’ e che contemplano in maniera intrinseca gli effetti dell’incoerenza, della propagazione e della risposta sismica locale. Gli accelerogrammi selezionati si riferiscono, pertanto, alle registrazioni acquisite in corrispondenza di stazioni situate su sottosuolo deformabile e rappresentativo delle classi di sottosuolo indicate dalle NTC 2008, e per le quali sia disponibile una contemporanea registrazione su affioramento rigido, a distanza limitata nell’ordine di centinaia di metri che possa essere considerata come moto di riferimento. Le uniche coppie di stazioni accelerometriche italiane che rispondono a tali requisiti sono risultate (Landolfi et al., 2011):

- Classi A-B: San Rocco (rigido) / Forgaria-Cornino (deformabile);
- Classi A-C: San Giuliano di Puglia - sito A/Chiesa (rigido) / San Giuliano di Puglia - sito B/Scuola (deformabile);
- Classi A-D: Cesi Monte (rigido) / Cesi Valle (deformabile).

Nella Tabella 1 sono riportate le principali informazioni sulle registrazioni selezionate in questo studio.

Tabella 1: Sintesi delle principali caratteristiche del set di dati accelerometrici utilizzato in queste analisi

Sito	Codice stazione (ITACA)	Classe di sottosuolo (NTC 2008)	Distanza relativa [m]	Azimut [°]	# Eventi	Periodo di registrazione	M_L	Distanza epicentrale [km]
Forgaria–Cornino	FRC	B	603	17.5	8	1976-1977	4.1-6.1	28.8-51
San Rocco	SRC	A						
San Giuliano – B	SGIUB	C	435	346	12	2002	3.5-4.3	8.0-15.0
San Giuliano – A	SGIUA	A						
Cesi Valle	CESV	D	207	70.6	20	1997-1998	2.2-5.3	2.6-141.3
Cesi Monte	CESM	A						

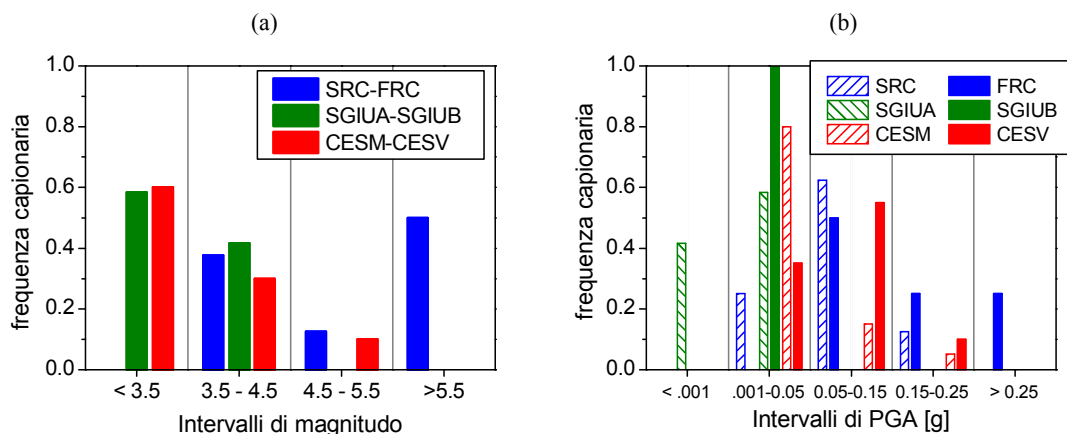


Figura 1. Schema del modello a masse concentrate considerato in questo studio.

In totale sono state utilizzate:

- per la coppia di stazioni A-B, 8 registrazioni della sequenza sismica del Friuli (1976-1977);
- per la coppia di stazioni A-C, 12 registrazioni degli *aftershock* del terremoto di San Giuliano di Puglia del 2002 (rete mobile ITDPC);
- per la coppia A-D, 20 registrazioni della sequenza sismica Umbro-Marchigiana del 1997-1998 (rete mobile ITDPC).

In Figura 1 si riportano le distribuzioni campionarie della magnitudo locale, M_L , e dell'accelerazione di picco, a_{max} , delle registrazioni. La maggior parte degli eventi sismici disponibili ha una magnitudo minore di 4.5 e le registrazioni presentano a_{max} inferiore a 0.05g. La Figura 2b evidenzia, inoltre, qualitativamente gli effetti di amplificazione locale.

Gli spostamenti relativi sono stati valutati nella direzione congiungente le due stazioni (indicata come 'longitudinale') e in quella ad essa ortogonale (indicata come 'trasversale'). Le registrazioni selezionate per ciascuna coppia di stazioni sono state, pertanto, proiettate nelle due direzioni come mostrato nell'esempio riportato in Figura 2 per una registrazione dalla coppia di stazioni SRC-FRC. Per ciascun evento si sono, pertanto, ottenute 2 coppie di registrazioni accelerometriche, indicate con $a_R(t)$ e $a_S(t)$ rispettivamente per le registrazioni di riferimento su affioramento rigido e per quelle sul terreno deformabile. Di esse sono stati calcolati gli spettri di risposta e le storie temporali degli spostamenti, ottenute mediante doppia integrazione numerica degli accelerogrammi.

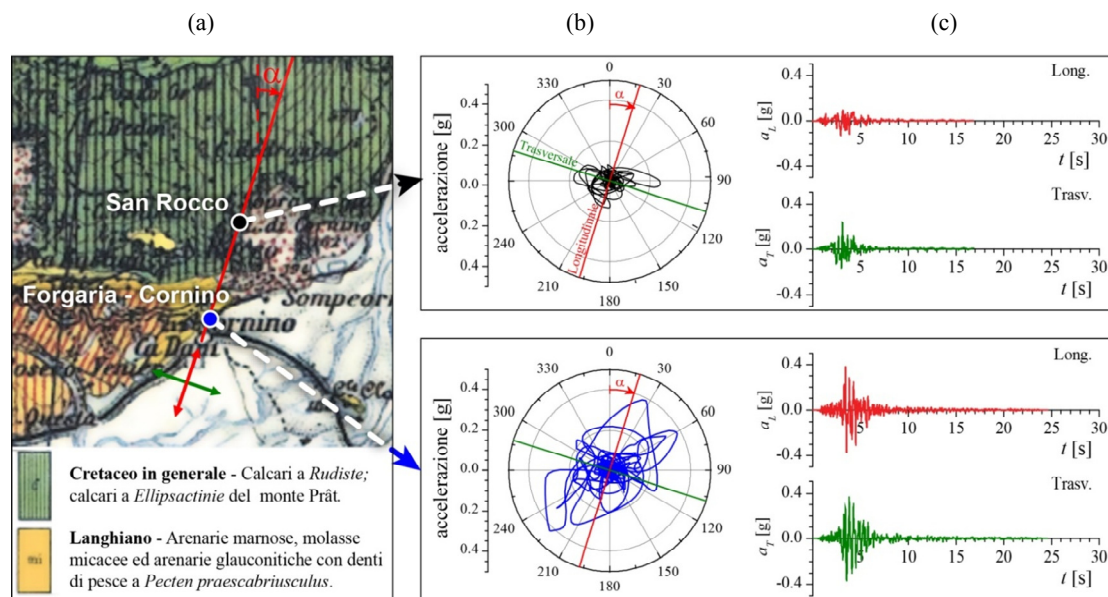


Figura 2. Proiezioni degli accelerogrammi nelle direzioni trasversale e longitudinale per le stazioni di San Rocco e Forgia-Cornino: (a) identificazione delle stazioni su carta geologica, (b) diagrammi polari delle accelerazioni e (c) storie temporali dell'accelerazione.

Indicazioni Normative

La Normativa Tecnica Nazionale prescrive la necessità di tenere in conto degli effetti dell'asincronismo del moto per opere con sviluppo longitudinale significativo, nel caso in cui le condizioni di sottosuolo nei punti di contatto terreno-struttura risultino talmente variabili da richiedere l'uso di accelerogrammi o spettri di risposta differenti (§ 3.2.5). In particolare, se l'opera da analizzare è suddivisa in più parti, si può considerare un'azione sismica appropriata per ciascuna di esse. In questi casi, la Normativa prevede la possibilità di analizzare gli effetti dinamici in maniera indipendente per ciascuno dei punti di calcolo (ad esempio utilizzando

spettri di risposta appropriati per ogni parte della struttura), e sovrapporre gli effetti generati dagli spostamenti relativi, valutati attraverso metodi pseudo-statici.

Per il calcolo degli spostamenti relativi tra due punti generici i e j , d_{ij} , posti a distanza > 20 m e in assenza di importanti discontinuità orografiche, le NTC 2008 suggeriscono l'utilizzo della relazione derivante dallo studio pilota di Nuti & Vanzi (2005):

$$d_{ji} = d_{ij0} + (d_{ij\max} - d_{ij0}) \cdot f(x_{ij}, V_s) \quad (1)$$

in cui d_{ij0} è lo spostamento relativo che i due punti avrebbero se fossero posti a distanza minore di 20m, espresso come:

$$d_{ij0} = \alpha \cdot |d_i - d_j| \quad (2)$$

e $d_{ij\max}$ è lo spostamento massimo relativo tra due punti in cui il moto può considerarsi indipendente, espresso come:

$$d_{ij\max} = \beta \cdot \sqrt{d_i^2 - d_j^2} \quad (3)$$

Il fattore α che compare nell'eq. (2) è compreso tra un minimo di 1.05, per coppie di sottosuolo simili (ad esempio AB), ed un massimo di 1.25 per coppie molto diverse (ad esempio AD). Nella Normativa, sia per semplicità sia per maggior sicurezza nei confronti di un collasso fragile, si è posto $\alpha = 1.25$ per tutte le coppie di sottosuolo.

Il fattore β nell'eq. (3) dipende a sua volta dai parametri della funzione di coerenza, che mostrano una forte dispersione sperimentale. Per ragioni analoghe al caso precedente, nella Normativa si è posto cautelativamente $\beta = 1.25$.

Nelle eqq. (2) e (3), lo spostamento massimo nel generico sito, d_j , è definito dal tratto a spostamento costante dello spettro di risposta di Normativa per periodi maggiori di 10s:

$$d_j = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (4)$$

in cui:

- a_g è l'accelerazione di picco di riferimento;
- S è il coefficiente di amplificazione (prodotto tra i coefficienti di amplificazione stratigrafico, S_s , e topografico, S_t);
- T_C e T_D sono i periodi corrispondenti all'inizio del tratto a velocità e a spostamento costanti dello spettro di risposta, rispettivamente.

Il periodo T_D ed il coefficiente S_s sono definiti mediante una relazione lineare di a_g in funzione della classe di sottosuolo, mentre T_C è dipendente dal parametro T_C^* che è a sua volta definito in funzione della classe di terreno.

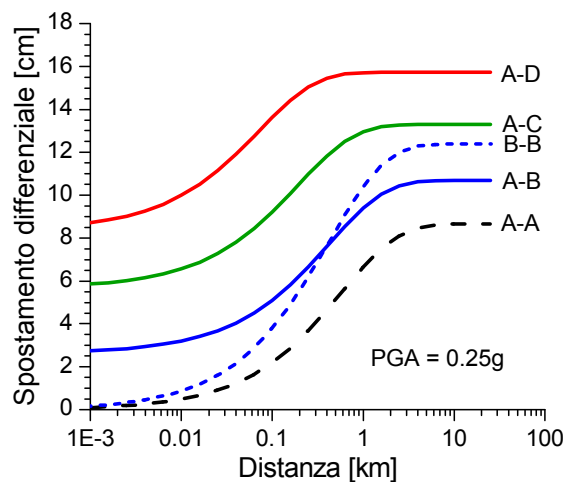


Figura 3. Andamento degli spostamenti differenziali in funzione della distanza tra i siti e delle classi di sottosuolo.

La funzione $f(x_{ij}, V_S)$ è crescente con la distanza tra i due siti, x_{ij} [in m], e decresce con la velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S [in m/s]:

$$f(x_{ij}, V_S) = 1 - \exp\left[-1.25\left(x_{ij}/V_S\right)^{0.7}\right] \quad (5)$$

Il fattore definito dalla (5) descrive la legge di variazione tra il valore dello spostamento a piccole distanze, d_{ij0} , e quello massimo, d_{ijmax} , nell'intervallo di distanza in cui il moto tra i due siti può essere considerato mutuamente influenzato.

In Figura 3 è mostrato l'andamento degli spostamenti differenziali, d_{ij} , calcolato con l'eq. (1) in funzione della distanza, x_{ij} , a parità di accelerazione di picco ($a_{R,max} = 0.25g$) al variare della classe di sottosuolo del sito deformabile (coppie AB, AC, AD). Sono altresì riportati i valori calcolati per coppie di stazioni che presentano la medesima classificazione (coppie AA e BB - linee a tratti). All'aumentare del contrasto di velocità si incrementano gli spostamenti iniziale e massimo, calcolati con le eqq. (2) e (3), e si riduce la distanza oltre il quale lo spostamento relativo può considerarsi indipendente.

I valori calcolati con le procedure proposte dalla Normativa sono stati confrontati con tre possibili approcci di calcolo dello spostamento relativo:

- I. valore massimo della differenza della storia temporale degli spostamenti registrati per i due siti;
- II. differenza tra i valori massimi dello spostamento spettrale;
- III. massimo dello spettro di risposta dello spostamento relativo, valutato a partire dalla storia temporale delle accelerazioni relative.

Approccio I: massimi spostamenti relativi

In condizioni *free field*, il massimo spostamento relativo tra due punti in superficie può essere definito come il valore di picco della differenza tra delle storie temporali degli spostamenti, $d_S(t)$ e $d_R(t)$, registrati ai siti, ovvero semplicemente:

$$\Delta d_{SR,max} = \max\{d_S(t) - d_R(t)\} \quad (6)$$

Per esempio, in Figura 4 le storie temporali degli spostamenti valutati nelle direzioni longitudinale e trasversale per l'evento più significativo registrato dalle stazioni di San Rocco (linea nera) e Forgaria-Cornino (linea blu), sono confrontati con la storia temporale degli spostamenti differenziali, Δd (linea rossa). In giallo è evidenziato lo sfasamento tra le due registrazioni dovuto all'asincronismo che implica, in questo caso, un picco dello spostamento differenziale maggiore rispetto a quelli dei singoli segnali di partenza.

In Figura 5 si riporta l'insieme dei valori dello spostamento relativo massimo, $\Delta d_{SR,max}$, in funzione del valore di $a_{R,max}$ registrato al sito di riferimento per le tre coppie di stazioni considerate.

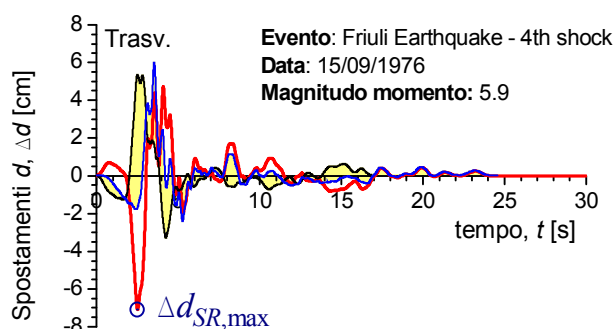


Figura 4. Storia temporale degli spostamenti dell'evento più significativo registrato dalle stazioni San Rocco (Classe A) e Forgaria- Cornino (Classe B).

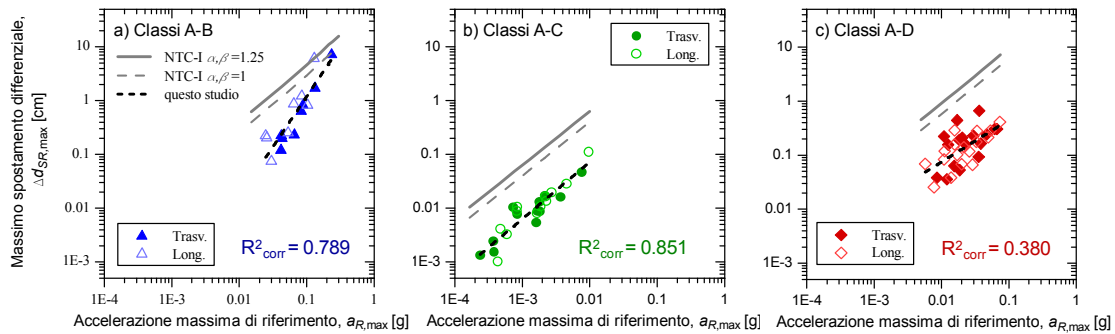


Figura 5. Confronto tra gli spostamenti differenziali massimi calcolati secondo le NTC 2008 e quelli ottenuti con l'approccio I per le tre coppie di stazioni accelerometriche (a: FRC-SRC; b: SGIUA-SGIUB; c: CESV-CESM).

I risultati ottenuti sono stati interpretati con una legge potenza (lineare in scala bi-logaritmica). I dati sperimentali sono confrontati con gli spostamenti calcolati con l'eq. (1) nella doppia ipotesi sui valori dei coefficienti α e β (indicati come: NTC-I $\alpha, \beta = 1.25$; NTC-I $\alpha, \beta = 1$). I parametri degli spettri di risposta di Normativa sono stati desunti dall'allegato B delle NTC in relazione alle coordinate geografiche dei siti in analisi a parità di accelerazione di picco.

Approccio II: differenza tra i massimi spostamenti spettrali

Come prima approssimazione, la Normativa consente di valutare lo spostamento relativo tra due siti anche come differenza tra gli spettri di spostamento. Tale approccio di fatto non consente di tenere in conto dell'effetto dell'asincronismo del moto tra i due siti. In linea di principio, infatti, lo spostamento relativo può essere calcolato ipotizzando, in modo estremamente cautelativo, che il moto tra i due punti sia in opposizione di fase, in questo caso gli spostamenti spettrali massimi devono essere sommati; in questo studio, gli spostamenti relativi sono stati invece valutati ipotizzando un moto in fase, ovvero come differenze tra i valori massimi degli spettri di risposta in spostamento.

In Figura 6 si riporta, a titolo di esempio, il confronto tra gli spettri di spostamento ottenuti per la registrazione dell'evento più significativo alla coppia stazioni delle classi A-B, e gli spettri di Normativa prescritti per i medesimi siti valutati a parità di accelerazione di picco di riferimento. Si osservi che gli spettri delle NTC su terreno deformabile sono a favore di sicurezza, se si eccettua la risposta per periodi inferiori a 2s in cui è possibile osservare un picco intorno a 0.5s, attribuibile ad effetti di amplificazione locale nel sito FRC (linea azzurra). Nel sito rigido SRC, invece, lo spettro NTC è prossimo a quello registrato.

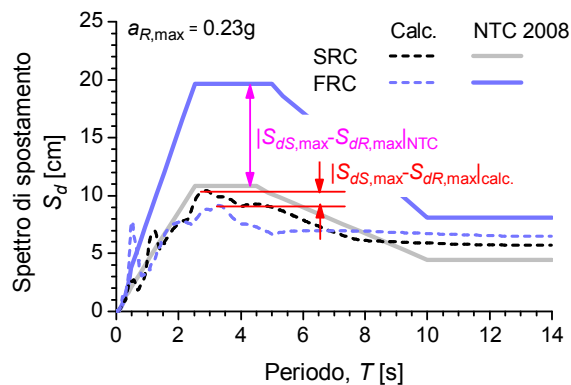


Figura 6. Confronto tra gli spettri di spostamento di Normativa e quelli calcolati per la coppia di stazioni Forgaria - San Rocco per il IV shock del terremoto del Friuli, 15/19/76 ($M_w = 5.9$).

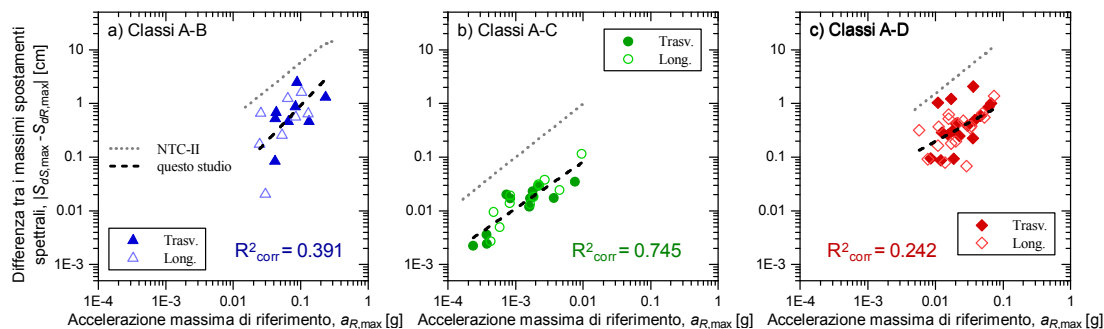


Figura 7. Confronto tra la differenza degli spostamenti spettrali massimi calcolati dagli spettri delle NTC 2008 e quelli valutati per le tre coppie di stazioni accelerometriche (Approccio II).

Nei grafici in Figura 7 sono mostrati i valori della differenza tra gli spostamenti spettrali massimi per le registrazioni delle tre coppie di stazioni analizzate, in funzione di $a_{R,max}$.

I valori di Normativa (indicati come NTC-II, linea discontinua grigia) sono stati valutati come differenza tra gli spostamenti spettrali calcolati nell'intervallo di periodi T_D-T_E corrispondente al plateau dello spettro di Normativa (cfr. Figura 6). In maniera analoga a quanto riportato nella Figura 5, i dati ottenuti sono stati interpretati con una legge potenza.

Rispetto al caso precedente, i valori campionari mostrano una maggiore dispersione, dovuta alla variabilità del periodo in cui può verificarsi il picco dello spettro di spostamento.

Approccio III: massimo spostamento spettrale relativo

In quest'approccio, per portare in conto gli effetti dell'asincronismo in termini di risposta spettrale, lo spostamento relativo è stato valutato come valore di picco dello spettro di risposta dello spostamento differenziale. Quest'ultimo è stato calcolato a partire dalla storia temporale delle accelerazioni relative tra i due siti di registrazione.

Nell'esempio mostrato in Figura 8, è riportato lo spettro di spostamento differenziale, $S_{\Delta d}$ (linea continua rossa). In questo caso, lo sfasamento tra le due registrazioni (cfr. Figura 4) comporta un aumento sensibile dello spettro di spostamento differenziale rispetto a quelli delle singole registrazioni.

In Figura 9 si riporta l'insieme dei valori di $S_{\Delta d,max}$ calcolati con tale procedura dalle registrazioni, confrontati con le due possibili interpretazioni della Normativa, indicate come NTC-I, cioè i valori calcolati con l'eq. (1), e NTC-II, ossia la differenza tra i valori massimi degli spettri di risposta di progetto.

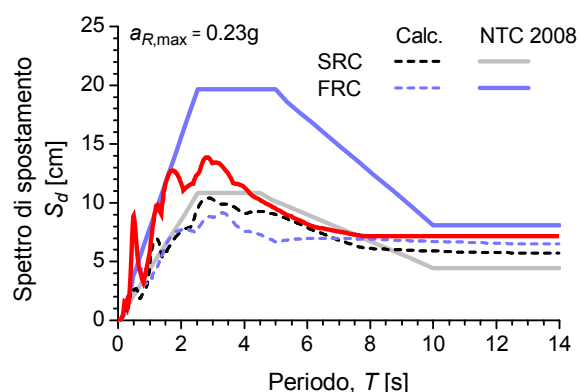


Figura 8. Confronto tra gli spettri di spostamento di normativa e lo spettro dello spostamento differenziale calcolato per il IV shock del terremoto del Friuli, 15/19/76 ($M_w = 5.9$).

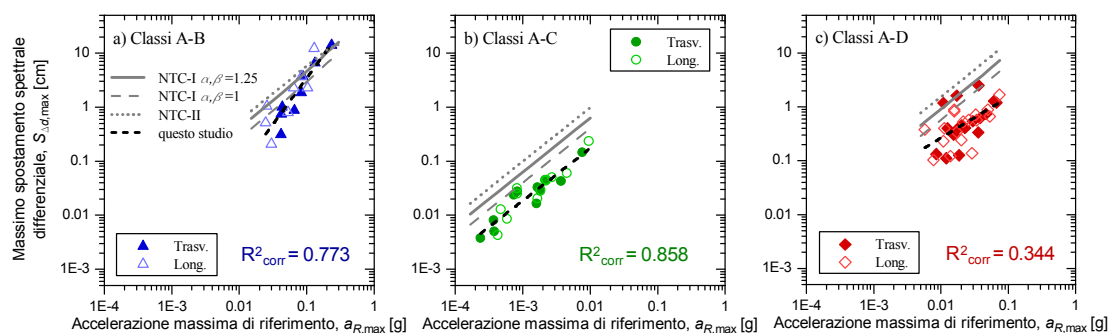


Figura 9. Confronto tra gli spostamenti differenziali calcolati secondo le NTC 2008 ed il valore massimo dello spettro di spostamento differenziale, valutati per le tre coppie di stazioni accelerometriche (Approccio III).

L'interpretazione dei dati sperimentali con quest'approccio si mostra nell'insieme più cautelativa rispetto a quelle riportate nelle Figg. 5 e 7; le funzioni di regressione risultano, inoltre, in accordo con quelle ottenute con l'approccio I, che di fatto ne rappresenta un caso particolare, essendo Δd_{SRmax} corrispondente proprio all'ordinata dello spettro $S_{\Delta d}$ per i periodi più elevati.

Conclusioni

In questa nota, le procedure derivanti da un'interpretazione più o meno rigorosa delle NTC 2008 per il calcolo degli spostamenti relativi tra due punti sulla superficie sono state confrontate con i valori ricavati da dati accelerometrici di registrazioni 'empiricamente correlabili' sul territorio nazionale. Queste ultime sono state selezionate tra coppie di stazioni sismiche delle reti nazionali, poste a distanza minore di un km, che presentano variabilità litostratigrafica e geomorfologica i cui effetti sono chiaramente riconoscibili dal confronto tra le registrazioni del medesimo evento.

Il calcolo degli spostamenti relativi è stato effettuato con tre approcci differenti.

Il primo approccio consiste nella valutazione del valore di picco della differenza tra le storie temporali degli spostamenti misurati dalle due stazioni accelerometriche. Questo criterio interpreta nella forma più rigorosa il fenomeno reale. Applicando in tal senso le indicazioni Normative, si ottengono stime superiori anche per un ordine di grandezza dei dati sperimentali. La sovrastima appare decrescente con l'intensità del moto per le coppie di siti A-B (cfr. Figura 5).

Il secondo approccio prevede il calcolo della differenza tra i valori massimi degli spettri di risposta in spostamento, valutati per i due siti. Tale approccio presenta il vantaggio di non richiedere un'analisi dinamica di risposta locale; d'altro canto, poiché non tiene conto dell'asincronismo del moto, comporta una stima approssimativa e limitata degli effetti dello sfasamento del segnale. Di fatto, i valori di spostamento spettrale possono essere considerati solamente contemporanei, in fase o in opposizione di fase, che corrispondono a previsioni estremamente prudenziali del massimo spostamento relativo. Il confronto, in questo caso, è stato effettuato con gli spettri di spostamento di progetto forniti dalla Normativa. Anche nell'ipotesi più ottimistica sull'effetto dello sfasamento, l'interpretazione delle indicazioni normative in tal senso appare comunque eccessivamente cautelativo rispetto ai valori sperimentali (cfr. Figura 7).

Infine si è proposto il calcolo in termini di valore di picco dello spettro di spostamento differenziale definito a partire dal moto relativo tra i due punti. In questo caso, un'analisi dinamica di risposta locale è necessaria per applicare le indicazioni della Normativa. Le

previsioni ottenute applicando gli altri due approcci alle indicazioni normative non risultano però sempre cautelative rispetto ai dati sperimentali, interpretati in tal senso (cfr. Figura 9).

Per tutti e tre gli approcci, i risultati confermano che le indicazioni di Normativa riescono comunque a cogliere la relazione funzionale tra gli spostamenti relativi e l'accelerazione di picco di riferimento, mantenendo quasi sempre un sufficiente margine di sicurezza.

I limiti della validazione empirica presentata in questo studio rimangono, tuttavia, condizionati dal numero esiguo di registrazioni 'empiricamente correlabili' individuate tra quelle delle reti accelerometriche nazionali. Le registrazioni delle poche stazioni individuate, inoltre, si riferiscono ad eventi di poche sequenze sismiche, spesso con magnitudo e accelerazioni di picco di scarso interesse ingegneristico (in modo particolare per la classe C). Per un'analisi finalizzata alla messa a punto di relazioni più generali di carattere affidabilistico, sarebbe, in linea di principio, necessario ampliare il campione di dati, introducendo le registrazioni di altri eventi sismici, anche non italiani, oppure utilizzando i risultati di analisi numeriche.

Bibliografia

- DM 14/1/2008. Norme Tecniche per le Costruzioni. S.O. n. 30 - *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 20-4/2/2008.
- Landolfi L., Caccavale M., d'Onofrio A., Silvestri F., Tropeano G., (2011). *Preliminary assesment of site stratigraphic amplification for shakemap processing*. V International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago (Chile), 10-13 January 2011.
- Chiarini M., d'Onofrio A., Evangelista L., Penna A. (2011). *The role of site effects and near-source seismic actions on ground and buildings response across the Aterno river valley. (Italy)*. V International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Santiago (Chile), 10-13 January 2011.
- Gazetas G., Dakoulas P., (1992). *Seismic analysis and design of rockfill dams: state of-the-art*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **11**(1), 27-61.
- ISO TC98/SC3 N 229, (2003). *Bases for design of structures – Seismic actions for designing geotechnical works*. ISO TC 98/SC3 WG10 (1st draft 2003).
- Nuti C., Vanzi I., (2005). *Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response*. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, **34**, 133-1374.
- Scasserra G., Lanzo G., Stewart J.P., D'Elia B. (2008). *SISMA (Site of Italian Strong Motion Accelerograms): a web-database of ground motion recordings for engineering applications*. Proc. of MERCEA'08, July 8-11, Reggio Calabria, Italy, **2**, 1649-1656.
- St. John C. M., Zahrah T. F., (1984). *Seismic design considerations for underground structures*. Advances in Tunnelling Technology and Subsurface Use, **4**(3), 105-112.
- Working Group ITACA, (2010). *Data Base of the Italian strong motion records*: <http://itaca.mi.ingv.it>.