



Considerazioni progettuali associate alla risposta di isolatori sismici e dissipatori di energia a scala reale

Studi sperimentali per la caratterizzazione di dispositivi antisismici hanno evidenziato come alcune specifiche siano difficili da realizzare e di discutibile significatività per la progettazione. Normative esistenti e modelli di calcolo, basati su forti semplificazioni del comportamento dei dispositivi comunemente utilizzati, non tengono conto della variabilità dei parametri prestazionali, evidenziata sperimentalmente. È necessario l'aggiornamento delle norme ma anche rendere consapevoli i progettisti dei limiti delle modellazioni semplificate

DOI 10.12910/EAI2015-079

■ G. Benzoni

Introduzione

Al compimento di quindici anni di attività del laboratorio SRMD (Seismic Response Modification Devices) della University of California San Diego, interamente progettato e dedicato alle prove di qualificazione e certificazioni di soluzioni per l'isolamento sismico e la dissipazione di energia a scala piena, si possono riassumere alcune considerazioni, derivate da campagne sperimentali su dispositivi, ritenute importanti per la progettazione con isolamento sismico. Va notato che la specifica attrezzatura di prova del laboratorio SRMD (Benzoni, 2010) ha contribuito ad ampliare enormemente la credibilità delle tecnologie in esame, attraverso prove di dispositivi sottoposti a regimi di forza e di moto non scalati bensì corrispondenti a condizioni di servizio e condizioni limite per la struttura. In particolare il laboratorio ha accumulato un database di dati sperimentali unico al mondo per la varietà sia di

dispositivi provati sia di protocolli di prova. Questa attività, al servizio di agenzie, di progettisti e di produttori, consente inoltre la formulazione di alcune osservazioni sul ruolo del progettista di un intervento con isolamento, proposte di seguito.

Osservazioni derivate dall'attività sperimentale

La prima osservazione, di carattere generale, riguarda dispositivi sottoposti a prove di qualificazione che appartengono a famiglie ben note, anche se contengono elementi innovativi (da cui la necessità di qualificazione) in termini di dimensioni, di materiali impiegati, di prestazioni attese ecc. L'esperienza di laboratorio ha dimostrato che anche dispositivi appartenenti a tipologie consolidate, possono esibire comportamenti inattesi e addirittura problematicità gravi con premature rotture dei dispositivi. Questa osservazione, confermando il ruolo importante della sperimentazione, si pone in vistoso contrasto con una procedura, a volte chiamata pre-qualificazione, che vorrebbe una sorta di automatica accettazione di dispositivi in quanto

Contact person: Gianmario Benzoni
gbenzoni@ucsd.edu



appartenenti a famiglie di cui si posseggono alcuni dati sperimentali, anche se provenienti da dispositivi non identici. In altre parole, ci si vorrebbe affidare a una sorta di similitudine tra dispositivi, sulla base del condiviso meccanismo di funzionamento, dell'uso di materiali simili o identici, del rispetto di alcune proporzioni geometriche ecc.

Va notato che alcuni codici normativi contengono un linguaggio sufficientemente vago al proposito, tale da ispirare l'uso di questa procedura, chiaramente apprezzata per la riduzione dei costi delle prove sperimentali che comporta. In molti casi la risposta di dispositivi, stimata sulla base di prove su unità "simili", ha manifestato inattesi funzionamenti e indicato parametri di risposta caratteristici fortemente diversi dai valori stimati. A titolo di esempio basti citare la ricorrente diversità dei parametri attritivi che si riscontrano durante le prove di isolatori a scala piena rispetto a valori ottenuti come estrapolazione o di risultati su campioni di materiale oppure su interi dispositivi con identici materiali ma differente geometria. Analogamente, per dispositivi elastomerici, la stima di rigidità laterale spesso non viene convalidata in fase sperimentale. Seppur in apparenza confinato ad ambienti accademici e normativi, questo argomento dovrebbe invece interessare da vicino il progettista di una struttura isolata, chiamato ad acquisire e ad approfondire la documentazione riguardante i dispositivi da usare nella forma più completa possibile. Questa iniziale osservazione introduce un intento comune a tutto ciò che sarà presentato in seguito: sottolineare come l'ingegnere strutturista non debba accettare, in maniera acritica, informazioni incomplete e/o indirette riguardanti il funzionamento di dispositivi cui è affidata una enorme quota parte di risorse in caso di evento sismico.

Disposizioni normative per isolatori e dissipatori

Non è possibile analizzare l'impatto della reale risposta di dispositivi antisismici sulla progettazione strutturale se non partendo dalle prescrizioni normative che determinano come il comportamento di isolatori e smorzatori debba essere acquisito ed interpretato. In generale, qualunque sia la specifica norma utilizzata, è opinione

condivisa che il numero di prove sperimentali, cui un prototipo di dispositivo debba essere sottoposto, sia estremamente esteso. È ben noto peraltro come l'elevato numero di prove non contribuisca necessariamente a un aumento dell'affidabilità del prodotto o della correttezza dell'applicazione. Molte normative vigenti, infatti, ancora contengono l'eredità di tempi in cui la conoscenza dei materiali e dei dispositivi, l'affidabilità produttiva e le capacità sperimentali erano limitate. L'elevato numero di prove deriva quindi come compensazione a una scarsa conoscenza del preciso meccanismo di funzionamento. In altre parole si cerca di sondare la risposta dei dispositivi con un'estesa ripetizione della stessa prova per ampi valori di carico, spostamento, velocità ecc. Questa sorta di mappatura della risposta del dispositivo per una vasta griglia di possibili azioni ha delle connotazioni sicuramente positive, quale la ricerca parametrica di comportamenti sperimentali che vanno oltre il limitato campo di impiego suggerito da uno specifico progetto. Ci si interroga infatti, in questo modo, sulla risorsa di prestazioni che il dispositivo è in grado di esibire al di là dei valori di progetto. Nonostante ciò la difficoltà che non trova soluzione e a volte vanifica questo enorme sforzo sperimentale deriva dall'esistente lacuna tra la fase di acquisizione di risultati, ottenuti con le estese campagne sperimentali, e l'implementazione da parte del progettista di queste informazioni nella fase specifica di progettazione. Per chiarire meglio questo concetto vengono qui riportati alcuni risultati ottenuti attraverso campagne di prova su due famiglie molto comuni di isolatori: dispositivi in gomma piombo e dispositivi a pendolo scorrevole. Si intende mostrare come le possibili variazioni dei principali parametri di funzionamento, per nulla trascurabili in termini di impatto sulla progettazione, sono in generale insufficientemente trattate dalle disposizioni normative ma soprattutto spesso ignorate o mal gestite nella modellazione della risposta di isolatori attraverso comuni programmi di calcolo.

Dispositivi in gomma-piombo

A titolo di esempio, e senza alcuna pretesa di generalizzazione, consideriamo la risposta di una serie di isolatori in gomma-piombo sottoposti a ripetuti cicli di spostamento.

Appare evidente (Figura 1) la significativa dipendenza della massima forza di taglio generata dai dispositivi dalla velocità di picco del moto, con incrementi massimi, rispetto a prove lente (0,76 mm/s), del 73%, durante il primo ciclo, valore che si riduce a circa il 45% e il 30% rispettivamente durante il secondo e terzo ciclo. L'importanza della velocità di picco del moto risulta ugualmente rilevante in termini di resistenza caratteristica (*yield shear force Qd*), con incrementi a volte superiori al 100% rispetto a prove lente. Significativi incrementi con la velocità sono osservati anche in termini di rigidezza tangente post elastica. Tutte le prove su dispositivi gomma-piombo sottolineano una significativa variazione della risposta tra il primo ciclo di spostamento ed i successivi. Il progressivo riscaldamento del nucleo in piombo comporta infatti una dimostrata riduzione dei parametri caratteristici della risposta dell'isolatore con conseguente riduzione della capacità dissipativa. Questi effetti possono essere facilmente tradotti in modelli numerici di comportamento che consentano una dettagliata analisi della risposta strutturale (Benzoni e Casarotti 2009, Kikuchi et al. 2010) ma possono anche, in un approccio semplificato, consentire la definizione di intervalli di variabilità da associare all'analisi con parametri di progetto.

Attraverso questo esempio si vuole riconoscere una difficoltà persistente nell'integrazione tra le disposizioni normative e la pratica progettuale. Considerando il capitolo delle norme europee dedicato alle prove di caratterizzazione prototipale di questi dispositivi (EN15129, 2009, cap. 8.2.1.2.3) si riscontra la richiesta di ripetizione di prove cicliche per valori incrementali di velocità (attraverso diverse frequenze: 0,1 Hz, 0,5 Hz, 2,0 Hz dato il 100% di deformazione a taglio). La norma sembra quindi aver recepito l'importanza di una valutazione della dipendenza della risposta dell'isolatore dalla velocità del moto. Applicando la prescrizione della normativa, per esempio a un dispositivo recentemente sottoposto al laboratorio di UCSD, si ottiene una sequenza di tre test da eseguire con le caratteristiche elencate in Tabella 1.

È immediato notare dalla tabella come la prescrizione in termini di frequenza possa risultare in valori di velocità di picco del moto (sinusoidale) estremamente elevati (non esistono al momento apparecchiature di prova in grado di completare la prova a 2 Hz sopra indicata a causa della elevatissima velocità associata). Viene peraltro consentita dalla norma una modifica dei tre valori

di frequenza richiesti, qualora autorizzata dall'ingegnere strutturista. Oltre alla considerazione che durante prove di qualificazione di dispositivi da parte di un produttore l'ingegnere strutturista potrebbe non essere coinvolto (struttura ancora non definita), la possibile terna alternativa di 0,05, 0,25 e 1,0 Hz comporta velocità di picco rispettivamente di 0,08, 0,4 e 1,6 m/s che possono risultare ancora problematiche per il valore massimo e scarsamente informative per il valore più ridotto. Peraltro l'aspetto più discutibile di questa prescrizione lo si riscontra nei criteri di accettazione dei risultati. Infatti, i margini di accettabile variazione dei parametri fondamentali di funzionamento, anche se ragionevoli per prove a basse e medie velocità, diventano

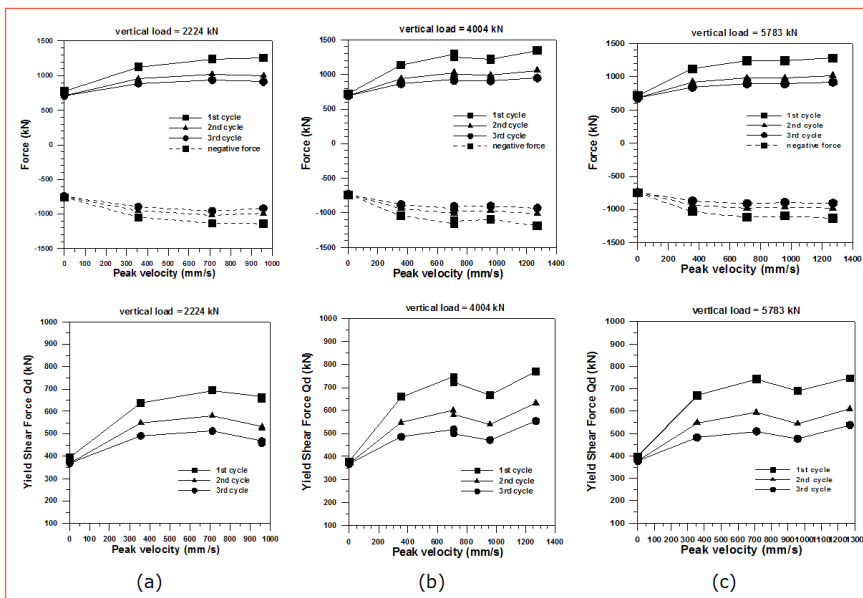


FIGURA 1 Forza di taglio (prima riga) e resistenza caratteristica Qd (seconda riga) per diversi valori di carico verticale e velocità di picco. (a)=2,7 MPa, (b)=4,9 MPa, (c)= 7,1 MPa

Deformazione a taglio	Tensione di compr. (MPa)	Input	Freq. (Hz)	Numero di cicli	Carico vert. (KN)	Spost. orizz. (m)	Vel. (m/s)
± 100%	5	Sinusoidale	0,1	3	10000	0,26	0,16
± 100%	5		0,5	3	10000	0,26	0,82
± 100%	5		2,0	3	10000	0,26	3,26

TABELLA 1 Esempio di prove richieste per un dispositivo gomma piombo secondo il paragrafo 8.2.1.2.3 delle norme europee EN 15129

proibitivi e irrazionali per le prove a velocità più alte. Nel caso specifico, infatti, è richiesto che la rigidità tangente del terzo ciclo della prova alla frequenza più bassa e più alta non differisca più del 20% dallo stesso valore per la prova a frequenza intermedia. Ne risulta, nel caso limite della Tabella 1, che il terzo ciclo della prova a 3,26 m/s non debba variare più del 20% dalla rigidità del terzo ciclo della prova a 0,82 m/s. Pur immaginando l'esistenza di una apparecchiatura in grado di eseguire il test a 2 Hz, risulta evidente come la ripetizione di tre cicli consecutivi alla velocità di picco di 3,26 m/s (o anche molto inferiore) non trovi rispondenza in alcuna realistica situazione. Il degrado di rigidità quindi non solo non può essere utilizzato in termini di confronto con le prove a velocità più bassa, ma neppure come realistico parametro a se stante. Chiaramente si confonde qui la necessità di sondare una variabilità di prestazioni per effetto della velocità, estremamente utile per il progettista, con una richiesta di prestazioni che neppure corrisponde a scenari possibili durante eventi sismici. La buona intenzione della norma (sondare la risposta di dispositivi per diversi valori di velocità) si traduce quindi in una difficoltà di esecuzione delle prove e in un termine di confusione per l'utilizzatore.

Dispositivi a pendolo scorrevole

Sono moltissimi a oggi i programmi di prova e gli esempi di applicazione completati con dispositivi ad attrito (singoli e doppi). Com'è noto, la diffusione di questa tipologia di isolatori è cresciuta enormemente a causa di alcune caratteristiche peculiari del loro funzionamento. Rispetto a isolatori in gomma ad alto smorzamento (HDRB) e in gomma-piombo (LRB), offrono una forma abbastanza compatta, con spessore notevolmente inferiore a parità di capacità di spostamento. Questa carat-

teristica li rende particolarmente indicati per interventi di adeguamento di strutture esistenti. Sono inoltre in grado di consentire spostamenti molto elevati, soprattutto nella soluzione a doppio pendolo. Con l'uso di questa tecnologia, la frequenza di vibrazione naturale della struttura isolata dipende solo dal raggio di curvatura della superficie di scorrimento e non dalla massa supportata, con conseguente prevedibilità della risposta sismica. Il loro costo è inoltre, in genere, inferiore rispetto ai dispositivi elastomerici. Pur dai principi di funzionamento concettualmente semplici, la qualità di produzione è di fondamentale importanza per la loro prestazione e si associa sia alla qualità del materiale a basso attrito come a dettagli costruttivi. Nell'opinione dell'autore la storia di questi dispositivi è stata in qualche modo contaminata dall'iniziale presentazione in letteratura dei loro principi di funzionamento in forma semplificata e quasi banalizzata, allo scopo di mostrarne gli aspetti salienti del comportamento e i vantaggi rispetto a prodotti concorrenti. Ripetute prove di laboratorio hanno confermato, però, come il fenomeno attritivo non sia facilmente "semplificabile".

L'onerosa campagna sperimentale richiesta per la caratterizzazione di un dispositivo ad attrito si contrappone al fatto che l'esteso numero di risultati sperimentali si traduca con difficoltà, ed in misura limitata, in precise indicazioni progettuali. In modo più appropriato si potrebbe dire che la positiva qualificazione garantisce al progettista la qualità del prodotto in termini generali e la corrispondenza di parametri fondamentali della risposta a valori "di progetto" (vedi il coefficiente di attrito o l'energia dissipata per ciclo). Si notano, però, variazioni di questi parametri che possono sicuramente riproporsi durante il moto sismico o, a maggior ragione, durante la vita della struttura (durabilità). Le indicazioni normative vigenti, anche se prescrivono prove o criteri di accettazioni volti a quantificare e contenere

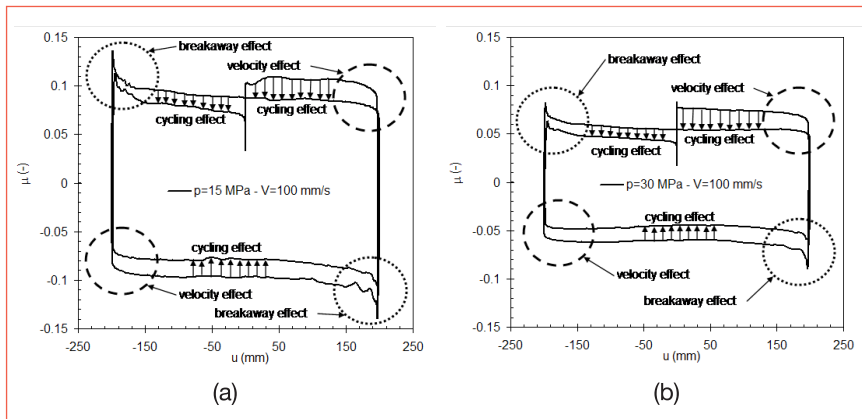


FIGURA 2 Coefficiente di attrito funzione dello spostamento relativo orizzontale

entro intervalli accettabili queste variazioni, non suggeriscono però al progettista il criterio di implementazione dell'informazione. Questa limitazione appare motivata dal fatto che le norme esistenti rispecchiano un'eccessiva semplificazione dei meccanismi reali di funzionamento, che previene la regolamentazione ed interpretazione di importanti fenomeni visibili in fase di sperimentazione. Per chiarire questo punto di vista, consideriamo che le caratteristiche attritive dei materiali impiegati vengono modificate significativamente in funzione delle condizioni di carico e delle caratteristiche del moto. In Figura 2 sono riportate le risposte di un pendolo scorrevole in termini di coefficiente di attrito (μ) e spostamento relativo (u) del dispositivo per valori di pressione pari a 15 MPa (a) e 30 MPa (b).

È possibile evidenziare quattro effetti associati a variazioni delle caratteristiche attritive del dispositivo:

1. Effetto della pressione di contatto, legato alla riduzione del coefficiente di attrito all'aumentare del carico verticale applicato. Il confronto tra le Figure 2(a) e 2(b) mostra, ad esempio, come il coefficiente di attrito si riduca, per il dispositivo in esame, da un valore di circa l'8% al 5%, all'aumentare della pressione.
2. Effetto legato alla ripetizione dei cicli (*cycling effect*), che si manifesta come continua riduzione del termine di attrito con il prolungamento del moto. Questo effetto è tanto più pronunciato quanto più elevata è la velocità del moto stesso.

3. Effetto velocità, che considera la variazione del coefficiente di attrito al variare della velocità. È visibile, per esempio, la riduzione del coefficiente in prossimità dei massimi spostamenti dei cicli di Figura 2, a causa di un input di forma sinusoidale e di una conseguente riduzione della velocità all'inversione del moto.

4. Un effetto *breakaway* o di transizione da una condizione di attrito statico a una di attrito dinamico, osservabile in repentini innalzamenti del coefficiente di attrito all'inizio e all'inversione del moto.

Tra i quattro effetti elencati, il termine forse più significativo, ai fini della corretta caratterizzazione del comportamento di un dispositivo a pendolo scorrevole risulta il termine legato alla ripetizione dei cicli. Il continuo movimento relativo delle parti comporta una variazione di temperatura sulle superfici a contatto e un conseguente *softening* del materiale a basso attrito. Questa condizione genera un sottile film di materiale sulla superficie che agisce come lubrificante solido. Il fenomeno può, ad esempio essere modellato attraverso una funzione che tenga conto dell'ampiezza dello scorrimento così come della ripetizione del moto stesso sulla stessa porzione di superficie (Lomiento et al., 2013). L'effetto combinato dei fenomeni descritti sopra, in termini di energia dissipata (EDC) è visualizzato in Figura 3, dove sono confrontati i valori sperimentali di EDC con un modello che non tiene conto del degrado delle caratteristiche attritive (linea continua senza simboli) e con un modello in cui sono stati implementati gli effetti sopra citati (linea tratteggiata).

L'inadeguatezza di un modello non degradante è chiaramente visibile per valori di velocità superiori a 10 mm/s. Appare evidente come l'esclusione degli effetti associati a pressione, velocità e ripetizione dei cicli (fenomeni termici) comporti una sovrastima significativa della capacità dissipativa del dispositivo, soprattutto per la condizione di 60 MPa che amplifica i fenomeni termici generati, col conseguente rischio di livelli di spostamento della struttura isolata superiori ai valori di progetto. È intuibile

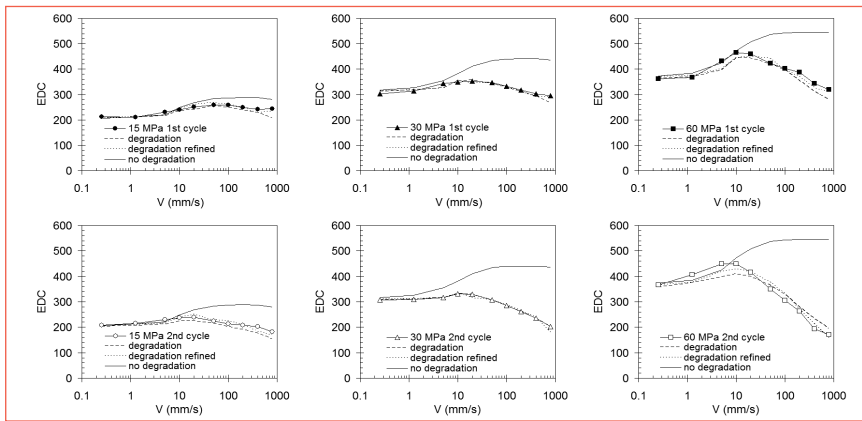


FIGURA 3 Valori sperimentali e numerici di energia dissipata per diversi valori di velocità. Riga superiore relativa al primo ciclo, riga inferiore relativa al secondo ciclo

Scopo	Caratteristiche
Tests per caratterizzare "effetto carico verticale"	Spostamenti e velocità limitati
Tests per caratterizzare "effetto della velocità"	Moto circolare in piano per minimizzare effetti termodinamici evitando lo scivolamento ripetuto sulla stessa porzione di superficie
Tests per calibrare un modello di degrado per "ripetizione dei cicli"	Moto multidirezionale

TABELLA 2 Possibili criteri ispiratori di nuovi protocolli di prova per dispositivi a pendolo scorrevole

le, inoltre, come il *cycling effect*, associato allo sviluppo di fenomeni termici, sia funzione del reale percorso delle superfici in movimento che durante un evento sismico non è di natura mono-direzionale (come molte prove prescrivono) bensì bi-direzionale in pianta. Sulla base dell'esempio proposto, e di molte altre considerazioni riportate in letteratura, ci si auspica una rapida revisione delle norme correnti alla luce di specifici fenomeni osservati, quali quelli indicati sopra, ma anche di fenomeni di stick-slip, di disuniforme distribuzione di pressione all'interfaccia di scorrimento, di reali capacità ricentranti ecc., allo scopo di fornire una indicazione progettuale facilmente fruibile dal progettista. Si possono ipotizzare, come mostrato in Tabella 2, prove che minimizzino l'interazione tra i fenomeni sopra citati, in modo da caratterizzare la variazione del coefficiente d'attrito come funzione di un solo parametro.

Dal punto di vista progettuale, i fenomeni descritti non possono essere trascurati, come spesso avviene, con la giustificazione di esistenti modelli implementati in programmi di calcolo commerciali o di difficoltà di implementazione numerica. Per uno studio, tuttora in corso, degli effetti delle diverse modellazioni dell'attrito sulla risposta strutturale, è stata considerata una semplice struttura a telaio in cemento armato di 4 piani con 3 m di interpiano, a pianta quadrata con telai a 2 campane di 5 m di lunghezza isolato alla base con isolatori ad attrito.

La struttura è stata sottoposta a diversi set di accelerogrammi con componenti in una (X), due (XY) e tre (XYZ) direzioni. Tre diversi modelli di attrito sono stati adottati: 1) attrito funzione solo del termine di velocità, (2) attrito funzione del carico verticale e della velocità e (3) modello completo con attrito funzione di carico verticale, velocità ed effetti termici dovuti al movimento complessivo. I risultati delle analisi mostrano una significativa sensibilità di spostamenti e forze al modello di attrito sia a livello locale di isolatore che a livello d'insieme per la struttura, in termini di differenze tra valori massimi di spostamenti e forze attese.

Nella Figura 4 sono riportati, a titolo di esempio, gli spostamenti in direzioni ortogonali in pianta (X e Y) per l'input sismico tridimensionale di Kobe del 1995 e di Loma Prieta del 1989. L'incremento di spostamento massimo complessivo della struttura nel caso di modello 3 (modello completo di degrado delle caratteristiche di attrito del dispositivo) appare evidente.

Dalle analisi emerge inoltre la diversa risposta per eccitazioni mono e multi direzionali. In particolare i cicli forzato spostamento lungo una componente di moto sono significativamente più stretti durante un moto bi-direzionale in pianta piuttosto che durante il corrispondente moto mono-direzionale. Questo significa che le componenti di spostamento in un moto bi-direzionale possono essere significativamente più elevate in confronto all'equivalente componente di spostamento sotto eccitazione mono-direzionale. Inoltre il moto bi-direzionale comporta maggiori

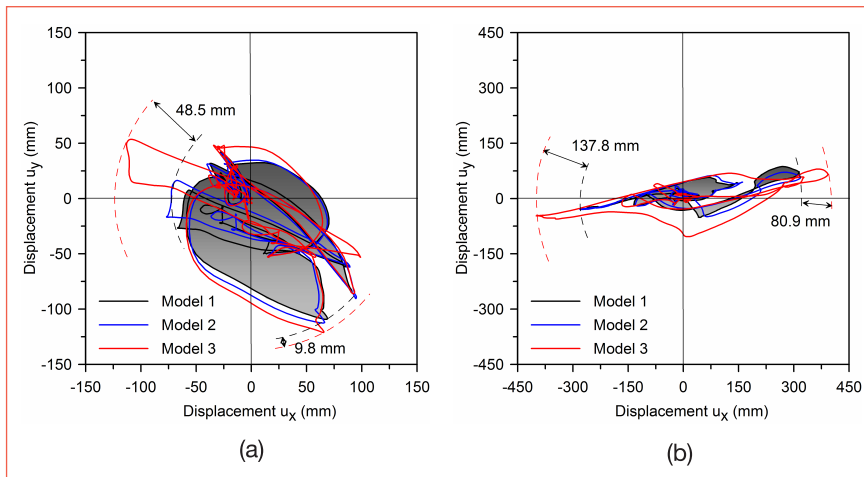


FIGURA 4 Spostamenti in pianta della struttura in cemento armato allo studio sotto l'azione dell'eccitazione tridimensionale di Kobe (a) e di Loma Prieta (b)

spostamenti e velocità, cui sono associati maggiori flussi di calore. Questo incremento di flusso di calore comporta maggiori riduzioni del coefficiente di attrito, con conseguente ulteriore incremento degli spostamenti attesi. Ne consegue che nella maggioranza dei casi, le analisi monodirezionali non sono rappresentative del comportamento dell'isolatore durante eccitazione sismica.

risposta e stima dell'affidabilità dei dispositivi con una chiara struttura interpretativa dei risultati sperimentali, finalizzata ad una proficua fruizione da parte del progettista. ●

Conclusioni

Seppur non generalizzabili, gli effetti osservati suggeriscono un'attenzione da parte del progettista alla fase di modellazione della risposta dei dispositivi, non correttamente rappresentata da approcci lineari equivalenti o esageratamente semplificati. Si suggerisce, in questo senso, l'uso di modelli recenti, esistenti in letteratura, validati sulla base di estese campagne sperimentali. Al tempo stesso ci si augura che gli sviluppi futuri delle normative siano in grado di armonizzare i passaggi necessari per una rigorosa caratterizzazione della

Gianmario Benzoni
University of California San Diego, La Jolla,
Department of Structural Engineering

abstract

Design considerations associated with the response of seismic isolators and real scale energy absorbers

Few observations obtained from extensive experimental programs for the characterization of anti-seismic devices are proposed hereafter. Specifically, few current code requirements, originally intended for the acquisition of fundamental characteristics of performance, proved difficult to be implemented and of questionable significance for the design phase of a seismic isolation application. In particular, for commonly used devices as elastomeric and friction-based isolators, the experimentally validated variation of performance parameters is often not addressed in existing codes and typically neglected in structural models, based on extreme simplification of the device behaviour. The goal of this paper is to suggest an update to specific codes but particularly to solicit the designer's awareness against oversimplification in the modelling phase of the device performance.

bibliografia

- EN 15129 [2009]. Antiseismic Devices. Brussels: Comité Européen de Normalisation (CEN)
- Benzoni, G., Casarotti, C., [2009], "Effects Of Vertical Load, Strain Rate And Cycling On The Response Of Lead_Rubber Seismic Isolators", *Journal Of Earthquake Engineering*, Vol. 13, No. 3
- Benzoni, G., [2010], "The Smd Testing Equipment At The University Of California San Diego", *21mo Secolo, Scienza e Tecnologia*, April 2010, pp 55-60
- Kikuchi M., Nakamura T., Aiken I.D., [2010], "Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 39, No. 13, October
- Lomiento, G., Bonessio, N., Benzoni, G. [2013] "Sliding concave isolators performance under multi-directional excitations" *Ingegneria Sismica, International Journal of Earthquake Engineering*, 30(3), 17-32
- Lomiento, G., Bonessio, N., Benzoni, G. [2013] "Friction model for sliding bearings under seismic excitation", *Journal of Earthquake Engineering*, 17(8), 1162-119