

Isolamento sismico di strutture su pali

A. De Stefano, S. Foti, R. Lancellotta, V. Roma

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italy

SOMMARIO: Nel presente articolo viene studiato un sistema di isolamento basato sull'idea di svincolare la parte superiore dei pali di fondazione dal terreno circostante, in modo da aumentarne la flessibilità rispetto alle azioni orizzontali. L'efficacia della soluzione è vagliata mediante una serie di analisi parametriche su un modello semplificato, al fine di stabilire la sensibilità della risposta alla variazione dei parametri che descrivono il sistema. I problemi legati alla non-linearità geometrica e meccanica vengono successivamente esplorati con un modello agli elementi finiti, considerando come eccitazione esterna la registrazione di eventi sismici reali. Infine si estende lo studio a strutture intelaiate per individuare l'ordine di grandezza dei benefici. Gli studi suddetti forniscono risultati incoraggianti, evidenziando peraltro la necessità di introdurre nel sistema uno smorzamento per limitare gli spostamenti della sovrastruttura, come analizzato in una memoria parallela presentata dagli stessi Autori nel presente convegno.

ABSTRACT: In this paper a system to realise seismic isolation is suggested. It is based on a modification in the geometry of piles, that makes them especially flexible with respect to the horizontal motion, caused by the earthquake. The effectiveness of the system has been tested with a series of parametric analysis, aimed at assessing the sensibility of the system response to the physical factors of interest. Effects of geometric and material non-linearity have proved to be negligible. The last series of numerical simulation has been devoted to the application of the proposed isolation system to frame structures. The above studies gave encouraging results on the effectiveness of the isolation system, but they also stressed the necessity of additional damping to be introduced, because of the strong movements predicted on the superstructure. A special solution to be adopted in conjunction with this isolation system is presented by the Authors in a parallel paper in this congress.

1 INTRODUZIONE

La tradizionale progettazione delle strutture in zona sismica si basa essenzialmente sulla duttilità delle strutture. Infatti le scosse sismiche di notevole intensità provocano la plasticizzazione diffusa variando la deformabilità del sistema con conseguente notevole riduzione delle sollecitazioni sismiche indotte nella struttura. Tale approccio però, pur garantendo la sicurezza e la stabilità delle costruzioni, comporta l'accettazione di danni anche notevoli, che richiedono spese di riparazione non indifferenti. Inoltre alcune strutture (ponti, ospedali...) rivestono una importanza strategica per la società, che può essere amplificata dalle esigenze di soccorso nel periodo immediatamente susseguente il terremoto. Sulla scorta di tali considerazioni appare legittimo l'interesse che la comunità tecnico-scientifica rivolge a nuove tecniche di

progettazione antisismica, quale l'isolamento sismico, che garantiscano non solo la sicurezza degli occupanti, ma anche la permanenza in esercizio della struttura nel periodo immediatamente susseguente l'evento sismico.

L'isolamento sismico delle strutture si basa sull'interposizione di opportuni dispositivi tra il sistema di fondazione e la soprastante struttura, il che provoca il disaccoppiamento del moto tra terreno e struttura (Kelly & Eeri 1990). Il sistema così costituito assume un modo di vibrare prevalente sugli altri, caratterizzato da un periodo di vibrazione maggiore, rispetto a quello della

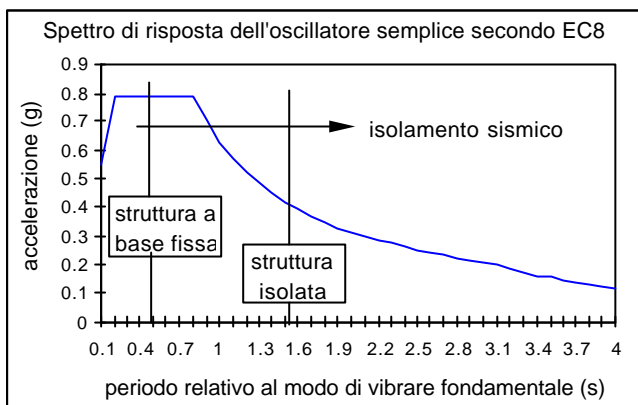


Figura 1 Principio base dell'isolamento sismico

struttura non isolata, e quindi corrispondente alla zona dello spettro di risposta caratterizzata da valori minori delle accelerazioni inerziali subite dall'oscillatore semplice. Tale concetto è sintetizzato in Figura 1, facendo riferimento alla posizione del primo modo di vibrare della struttura nell'ambito dello spettro di risposta dell'oscillatore semplice definito dall'Eurocodice 8.

I sistemi di isolamento usualmente utilizzati sono ad alto contenuto tecnologico e quindi comportano spese di costruzione e di manutenzione non indifferenti, che, come dimostrato da studi tecnico-economici (Parducci A. 1993), non risultano giustificati dal solo risparmio ottenibile in termini di riduzione dei costi di produzione, ma viceversa sono ampiamente compensati dall'abbattimento delle spese di riparazione susseguenti all'evento sismico.

In virtù di quanto detto appare evidente che la possibilità di isolare sismicamente la struttura tramite metodi per così dire alternativi, che comportino una riduzione delle spese di realizzazione rendendo maggiormente praticabile l'adozione di questa tecnica, deve essere guardata con particolare interesse. In tale ambito si colloca il presente lavoro, volto a studiare la fattibilità di un sistema di isolamento basato sulla variazione di rigidità dei pali di fondazione.

Il sistema proposto si basa sull'idea di svincolare la parte superiore dei pali di fondazione dal terreno circostante (Fig. 2), in modo da abbatterne drasticamente la rigidità rispetto alla traslazione orizzontale, pur mantenendo pressoché inalterata la capacità portante della palificata. I pali sono collegati in testa alla platea di fondazione tramite vincoli di tipo cerniera per evitare gli effetti di incastro e far sì che la struttura soprastante possa assumere effettivamente un modo di vibrare prevalente sugli altri, disaccoppiandone il moto da quello del terreno (Foti S. 1996).

L'idea non è del tutto rivoluzionaria in quanto una soluzione analoga è stata adottata in Nuova Zelanda, dove la sede centrale della polizia della città di Wellington è stata isolata mediante l'utilizzo di pali di fondazione flessibili accoppiati a smorzatori ad estrusione di piombo posti in corrispondenza della platea di fondazione (Robinson W.H. 1993).

2 ANALISI DI FATTIBILITÀ SU MODELLI SEMPLIFICATI

I problemi connessi alla fattibilità di tale sistema di isolamento sono non indifferenti sia dal punto di vista meccanico, per la resistenza degli elementi strutturali, sia da quello tecnologico-

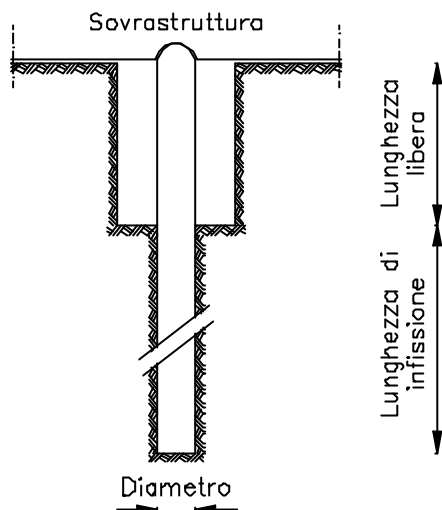


Figura 2 Schema di palo modificato

costruttivo, per quanto riguarda gli accorgimenti necessari per la realizzazione dei vincoli tra palificata e sovrastruttura e la separazione tra terreno e pali. Tralasciando questi ultimi aspetti, l'attenzione è rivolta principalmente all'individuazione della risposta sismica del complesso palificata-sovrastuttura e ai problemi meccanici legati alle forti sollecitazioni flettenti che si sviluppano nel singolo palo.

Per valutare l'influenza dei diversi parametri sulla risposta del sistema proposto, evitando di introdurre fin dall'inizio i problemi e le incertezze legate alla vera e propria interazione con la struttura soprastante, si è pensato di condurre una analisi parametrica su un modello particolarmente semplificato, che permettesse di cogliere gli aspetti peculiari del comportamento sismico del palo modificato.

In prima analisi il comportamento globale del sistema è stato studiato considerando la schematizzazione di molle accoppiate in serie riportata nella Figura 3b. Nel modello proposto si considera un oscillatore semplice, rappresentato in Figura 3a, e si accoppia in serie alla rigidità dell'oscillatore quella alla traslazione orizzontale della palificata, ottenendo il periodo fondamentale della struttura isolata.

Usualmente all'oscillatore viene associato anche uno smorzatore viscoso, posto in parallelo con la molla e quantificato da uno smorzamento c . Lo spettro di risposta è comunque riferito ad un determinato livello di smorzamento rapportato a quello critico. Per molte tipologie strutturali e relativi materiali tale valore viene assunto pari al 5%. Si è eliminato lo smorzamento nell'oscillatore semplice, perché ci si riferisce a tale valore usuale e si presuppone che l'introduzione dei pali non comporti sensibili variazioni allo stesso, ipotesi che dovrebbe essere plausibile quantomeno in prima approssimazione.

Per la valutazione di massima degli effetti legati alla presenza della palificata sull'oscillatore semplice, si è pensato di considerare la rigidità di questa rispetto alle forze orizzontali come una seconda molla, posta in serie con quella che caratterizza l'oscillatore, e di trascurare del tutto la massa della parte libera dei pali, dal momento che questa è certamente di gran lunga inferiore rispetto a quella della struttura nel suo insieme (Fig. 3b).

Un siffatto modello consente lo studio parametrico della risposta del sistema globale al variare delle grandezze che ne determinano il comportamento.

La valutazione dei risultati ottenibili in base alle configurazioni possibili del sistema, dettate da scelte progettuali e da fattori fissi nell'ambito del progetto del sistema di isolamento, quali il periodo proprio della sovrastruttura assegnata e le caratteristiche geotecniche del terreno di

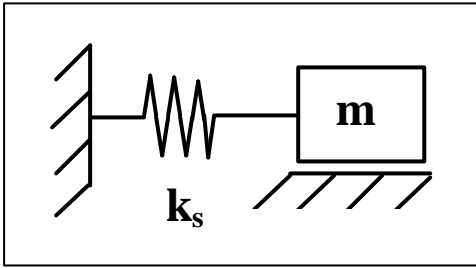


Figura 3a Schema di oscillatore semplice

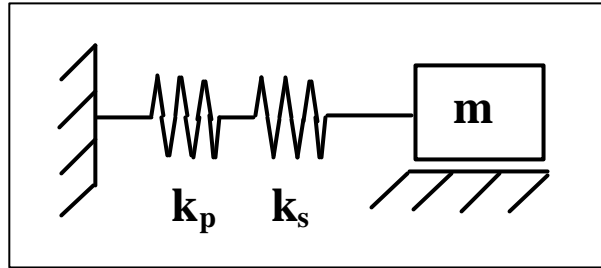


Figura 3b Accoppiamento pali-oscillatore semplice

fondazione, è stata effettuata scegliendo come parametri il grado di isolamento, la riduzione delle accelerazioni dovute al sisma sulla struttura e il momento massimo stimato sui pali.

Il grado di isolamento α è usualmente definito in letteratura (Palazzo & 1993) come il rapporto tra il periodo fondamentale della struttura isolata ed il periodo della stessa struttura in assenza del sistema di isolamento ovvero:

$$\mathbf{a} = \frac{T_{is}}{T_{bf}} \quad (1)$$

Le linee guida del Servizio Sismico Nazionale (1993) richiedono un grado di isolamento pari perlomeno a 2. Per vagliare l'efficacia del sistema proposto, nelle analisi parametriche il grado di isolamento è servito da discriminante per avere delle indicazioni sull'effettiva efficacia dell'isolamento in funzione del periodo proprio dell'oscillatore semplice considerato.

Per quanto riguarda la risposta sismica del sistema si è fatto riferimento allo spettro di risposta dell'oscillatore semplice definito dall'Eurocodice 8. In base al periodo del modo di vibrare fondamentale della stessa struttura, considerata prima a base fissa e poi isolata, si è calcolata l'accelerazione inerziale sulla massa che rappresenta la struttura. La differenza percentuale tra tale accelerazione sul sistema isolato e su quello a base fissa ha costituito il parametro di valutazione dell'efficacia del sistema di isolamento.

L'accelerazione calcolata sulla struttura isolata ha inoltre permesso di ottenere una stima del momento massimo sollecitante sui pali, che, dal punto di vista meccanico, rappresenta il problema maggiore per la realizzabilità della soluzione proposta.

Le analisi parametriche sono state condotte facendo variare tutti i fattori che determinano il comportamento del sistema isolato e studiando l'influenza che tali variazioni comportano nei confronti dei tre parametri di giudizio di cui sopra. Procedendo in tal modo si è analizzata separatamente l'influenza del periodo di vibrare fondamentale della struttura a base fissa, della lunghezza di infissione dei pali di fondazione, della porzione di palo svincolata dal terreno, delle caratteristiche meccaniche del suolo e del materiale impiegato per la realizzazione del palo. Alcuni casi ritenuti significativi sono riportati nelle figure 4-7.

Le strutture che ricevono maggiori vantaggi dal sistema, come era prevedibile, sono quelle aventi rapporto tra massa e rigidezza tale da dare un periodo fondamentale che si attesti nella zona dello spettro a risposta massima, in quanto per queste l'adozione del sistema di isolamento si traduce in una riduzione molto marcata delle accelerazioni sismiche (Fig. 4). Questo conferma l'utilità di uno schema costruttivo quale quello proposto, e, più in generale, di tutte le soluzioni di isolamento, per la protezione sismica di strutture aventi rigidezza globale medio-alta.

Come mostrato dalla Figura 5, per strutture rigide, i pali aventi un tratto libero anche solo di entità modesta sono sufficienti a produrre livelli di isolamento accettabili, mentre strutture flessibili richiederebbero lo svincolo di tratti di lunghezza eccessiva per ottenere gradi di isolamento superiore a 2, come richiesto.

Altro punto di fondamentale importanza è la snellezza dei pali utilizzati. Naturalmente diametri minori portano vantaggi maggiori, essendo molto elevata la flessibilità (Fig. 7), ma le sollecitazioni rilevate nella sezione di passaggio tra palo collaborante col terreno e parte libera

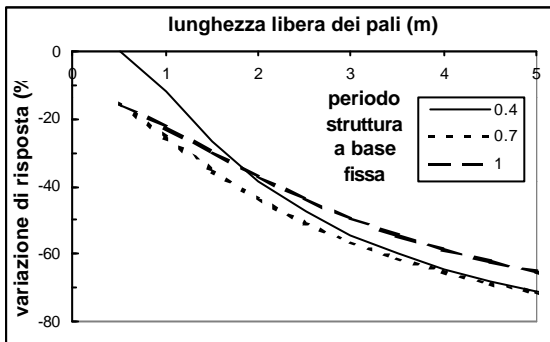


Figura 4 Riduzione delle accelerazioni sismiche

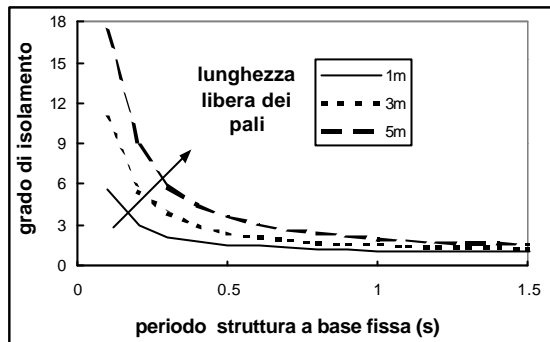


Figura 5 Livelli di isolamento ottenibili

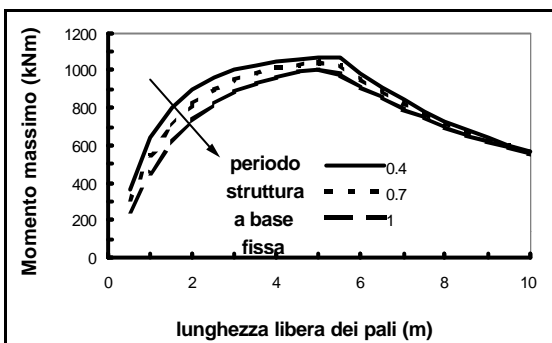


Figura 6 Sollecitazioni meccaniche sui pali

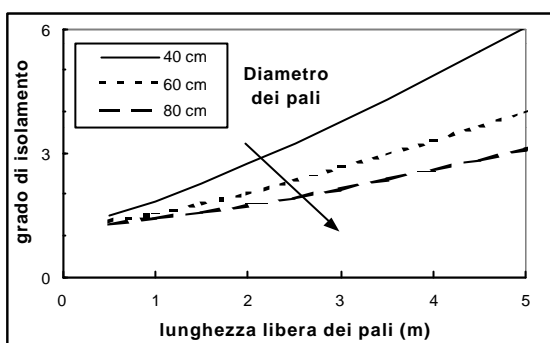


Figura 7 Influenza della flessibilità dei pali

portano a scartare l'utilizzo di pali con diametro inferiore ai 50 cm ed a preferire pali di grosso diametro, anche se questi ultimi comportano vantaggi minori.

Per quanto riguarda il numero di pali da utilizzare si nota un andamento contraddittorio legato alla massa associata a ciascun palo. Caricando notevolmente i singoli pali e quindi utilizzandone in totale un numero minore per la stessa struttura, si abbassa la rigidezza alla traslazione orizzontale, aumentando il grado di isolamento, ma così facendo le sollecitazioni sui pali stessi, legate alla massa, crescono. E' dunque di primaria importanza trovare un giusto equilibrio tra il grado di isolamento ottenuto e le sollecitazioni sui pali, regolando la massa affidata a ciascun palo. Quindi può convenire utilizzare più pali meno approfonditi o comunque non sfruttare fino in fondo la capacità portante disponibile in base al tipo di terreno ed all'approfondimento, per garantire la resistenza meccanica dei pali stessi.

Proprio riguardo alla resistenza meccanica si noti la Figura 6, in cui il tratto di palo disaccoppiato dal terreno circostante è stato protratto oltre quelli che sarebbero considerati i limiti ragionevoli, per indagare il manifestarsi dell'inversione di tendenza della crescita del momento dovuta al prevalere dell'effetto isolamento rispetto all'effetto di aumento del braccio della forza in testa al palo. Dai risultati appare chiaro che la tendenza si manifesta per valori comunque molto elevati della porzione svincolata, e quindi i benefici di tale effetto non sono perseguibili.

Infine è da notare la notevole importanza rivestita dal materiale con cui sono realizzati i pali: gli elementi in acciaio consentono una flessibilità certamente maggiore nelle scelte progettuali di isolamento, in quanto appaiono tollerare le sollecitazioni conseguenti all'adozione di una lunghezza libera qualsiasi, senza peraltro dover ricorrere all'adozione di dimensioni massime eccessive. Inoltre l'acciaio garantisce una elevata probabilità che la sottostruttura rimanga in campo elastico durante un evento sismico, anche di notevole intensità, in accordo a quelli che sono i concetti base dell'isolamento sismico, mantenendo in ogni caso delle riserve di resistenza per terremoti aventi intensità maggiore di quella prevista per il sito.

Al contrario, i pali in calcestruzzo armato appaiono utilizzabili solo in determinate situazioni di lunghezza libera e con diametri piuttosto elevati, dovendo, per problemi di resistenza del materiale, scartare la possibilità di utilizzare pali a diametro ridotto. Peraltro, la necessità di adottare diametri notevoli condiziona i vantaggi ottenibili dal sistema. Per ottenere un grado di isolamento accettabile, si ricorda che le *Linee guida all'isolamento sismico* del S.S.N. (1993) prevedono per quest'ultimo valori pari almeno a 2, bisognerebbe ricorrere a lunghezze libere molto elevate, con problemi costruttivi e pericolo di insorgere di effetti di secondo ordine geometrico.

La conferma della validità dei risultati ottenuti con il modello semplificato è stata ottenuta costruendo un modello agli elementi finiti della palificata (Foti S. 1996). In questo caso il vincolo palo-terreno nella parte collaborante è stato simulato con una serie di molle complesse discrete secondo l'approccio alla Winckler (Blaney G.W. et al. 1976, Roesset J.M. 1980). Tale modo di procedere ha permesso di prendere in conto le non linearità geometriche sui pali e le non linearità meccaniche del terreno.

In particolare la non linearità meccanica del terreno è stata simulata prendendo in considerazione una legge di variazione della rigidità con la deformazione di tipo bilatera ottenuta mediante linearizzazione delle curve P-y convenzionali per terreni argillosi e sabbiosi (Ghionna & Lancellotta 1985). Questo ha portato alla costruzione di molle non lineari che sono state associate a smorzatori di tipo viscoso, con parametri ricavati in base alle caratteristiche del terreno.

Le analisi non lineari sono state condotte mediante integrazione al passo nel tempo prendendo in considerazione alcuni accelerogrammi registrati, opportunamente scalati in modo da avere spettro di risposta simile a quello dell' Eurocodice 8.

Il confronto tra i risultati ottenuti dalle analisi non lineari, confrontati con quelli di analisi lineari condotte sullo stesso modello agli elementi finiti, portano ad affermare che gli effetti del secondo ordine su di un sistema siffatto sono trascurabili e dunque permettono di confermare la validità dei risultati ottenuti con il modello semplificato.

3 APPLICAZIONE ALLA TIPOLOGIA STRUTTURALE DEI TELAI PIANI

Lo scopo essenziale dell'isolamento delle strutture, oltre alla garanzia della sicurezza, è quello di ridurre in modo sostanziale i danni subiti dagli edifici. L'abbattimento dei costi di riparazioni conseguenti ad un evento sismico è infatti l'elemento che giustifica l'aumento di costi di costruzione affrontato.

Nel caso degli edifici multipiano soggetti ad azioni sismiche orizzontali il grado di danneggiamento degli elementi strutturali e accessori può essere correlato essenzialmente a due fattori: il massimo spostamento di interpiano e la massima accelerazione d'interpiano. Mentre la riduzione di quest'ultima è già stata rilevata utilizzando il modello approssimato, per procedere alla valutazione della variazione del primo fattore si è fatto ricorso all'analisi modale di alcuni telai. Tra l'altro tale applicazione ha pure permesso di confrontare i momenti di progetto sul telaio nel caso di edificio isolato e a base fissa, parametro che può essere messo in relazione ai costi costruttivi della struttura.

Sono stati presi in considerazione tre diversi telai con altezza pari rispettivamente a 3, 6 e 9 piani in modo di rappresentare una gamma di strutture con periodo fondamentale di vibrazione variabile tra 0.4 s e 1.3 s, e si è ipotizzato di fondarli su palificate flessibili aventi lunghezza del tratto di palo libero dal terreno tali da garantire grado di isolamento pari a 2 per una prima soluzione e 3 per una seconda.

Nel confrontare i momenti di progetto si è utilizzato un diverso fattore di struttura, per tenere conto del differente comportamento dinamico delle strutture isolate e del problema dell'insorgere di fenomeni amplificativi legati alla modifica dei modi di vibrare delle strutture in conseguenza dell'incremento di flessibilità legato alla duttilità. Quindi per avere un sufficiente margine di sicurezza nei confronti del collasso, pari a quello della struttura non isolata con coefficiente di struttura pari a 5, si è scelto di considerare per la struttura isolata un coefficiente

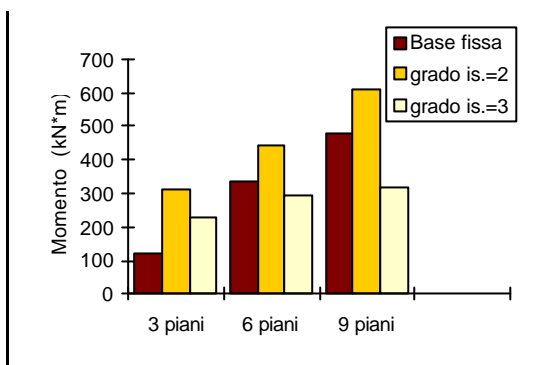


Figura 9 Momenti di progetto sui telai

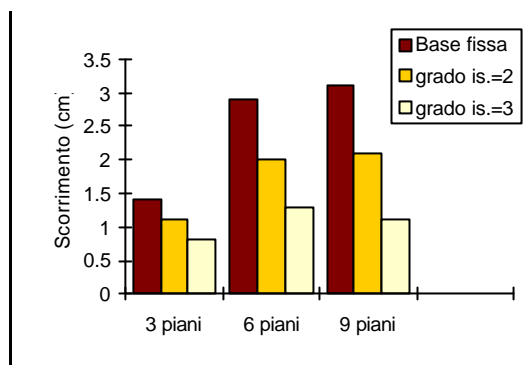


Figura 10 Scorrimenti di interpiano

di struttura uguale ad 1.5. Dalla Figura 9 si può notare che i momenti di progetto così calcolati restano comunque molto simili confrontando le diverse soluzioni per ciascuno dei telai considerati, ed in particolare sono più bassi per un grado di isolamento elevato: questo indica che orientativamente la progettazione della sovrastruttura non viene gravata di costi aggiuntivi. Bisogna però tenere presente che l'utilizzo del coefficiente di struttura 5 per la struttura a base fissa implica l'accettazione di danni notevoli alla sovrastruttura, pur garantendone la stabilità, in caso di sisma violento, mentre nel caso della struttura isolata il minor contributo legato alla duttilità implica danni molto più modesti.

Per quanto riguarda gli scorrimenti d'interpiano (Figura 10), si noti come l'adozione del sistema isolante provochi notevoli diminuzioni su tutti i telai considerati, e quindi un notevole contributo in termini di danneggiamento delle strutture portanti e degli elementi non strutturali che costituiscono l'edificio.

Bisogna però rilevare che gli spostamenti a livello della base calcolati per i diversi telai isolati sono di entità notevole, implicando la necessità di una attenta progettazione dei collegamenti esistenti tra l'edificio ed il terreno circostante, soprattutto dal punto di vista impiantistico. Una riduzione di tali spostamenti indesiderati potrebbe essere ottenuta accoppiando ai pali di fondazione flessibili opportuni dispositivi di smorzamento, come usualmente viene fatto per altre tipologie di isolamento.

4 CONCLUSIONI

Le analisi condotte permettono di affermare la validità della soluzione proposta che consente di ottenere i classici vantaggi dell'isolamento sismico utilizzando elementi quali i pali di fondazione, comunque presenti in diverse situazioni per necessità strutturali.

La necessità di provvedere alla limitazione degli spostamenti alla base della struttura isolata potrebbe essere soddisfatta modificando in modo opportuno la camera cilindrica che viene a crearsi tra palo e terreno circostante nella zona di sommità, inserendo in tale zona un fluido viscoso che, muovendosi per effetto del sisma, provochi uno smorzamento del moto in testa palo. Questa possibile soluzione è stata esplorata costruendo un modello matematico che simula il comportamento di un palo in moto orizzontale circondato da un fluido. Il modello ed i risultati ottenuti con esso sono presentati dagli stessi Autori in una memoria collegata (De Stefano et al. 1999).

Le indicazioni ottenute in termini di limitazione dei danni susseguenti l'evento sismico su edifici multipiano rivestono peraltro carattere generale e le relative considerazioni possono essere applicate essenzialmente a tutte le diverse soluzioni di isolamento strutturale, auspicando un maggiore sviluppo ed utilizzazione del relativo metodo progettuale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Blaney G.W., Kausel E., Roesset J.M. 1976. Dynamic stiffness of piles. In Desai, ed. *Numerical methods in geomechanics vol. II*. Blacksburg: ASCE: pp.1001-1013
- Commission of the European Community. 1993. *Eurocode 8: Earthquake resistant design of structures, part 1-1: General rules and rules for buildings Second draft October 1993*
- De Stefano A., Foti S., Lancellotta R., Roma V. 1999. Dissipazione dell'energia in strutture su pali. *Atti del IX convegno nazionale l'ingegneria sismica in Italia*, Torino, Settembre 1999
- Foti S. 1996. *Aspetti di isolamento sismico connessi alla tipologia delle fondazioni*, Tesi di laurea. Politecnico di Torino.
- Ghionna V.N. & Lancellotta R. 1985. Parametri di progetto per i pali soggetti a carichi orizzontali. *XII ciclo di conferenze di geotecnica di Torino*
- Kelly J.M. & Eeri M. 1990. Base Isolation: Linear Theory and Design. *Earthquake Spectra* 6(2):
- Palazzo B. & Petti L. 1993. Fattori di riduzione per strutture isolate alla base. *Atti del VI convegno nazionale l'ingegneria sismica in Italia*, Perugia, Ottobre 1993, pp. 265-274
- Parducci A. 1993. Aspetti economici dell'isolamento sismico. *Atti del VI convegno nazionale l'ingegneria sismica in Italia*, Perugia, Ottobre 1993, pp. 203-214
- Robinson W.H. 1993. Seismic isolation and related experimental research in New Zealand. *Atti del VI convegno nazionale l'ingegneria sismica in Italia*, Perugia, Ottobre 1993, pp.107-119
- Roma V. 1998. *Attenuazione della risposta sismica di strutture su pali*. (Attenuation of the seismic response of structures on piled foundations), Tesi di laurea (Master Thesis). Politecnico di Torino, maggio 1998
- Roesset J.M. 1980. Stiffness and damping coefficients for foundation. In O'Neil and Dodry, ed. *Dynamic response of pile foundations: analytical aspects* ASCE nat.conv, New York (USA), 1980, pp. 1-27
- Servizio Sismico Nazionale. 1993. *Linee guida per il progetto degli edifici con isolamento sismico* Roma Marzo 1993