



MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007 prot. 2007MFC3XT

1. Area Scientifico Disciplinare principale	08: Ingegneria civile ed Architettura
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	MAUGERI Michele
- Università	Università degli Studi di CATANIA
- Facoltà	Facoltà di INGEGNERIA
- Dipartimento/Istituto	Dip. INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
3. Titolo del programma di ricerca	Analisi del comportamento di pendii, fondazioni, scavi e gallerie in condizioni sismiche: calibrazione dei metodi semplificati di verifica sulla base dei risultati di modellazioni fisiche e numeriche avanzate; contributo alla "manutenzione" delle normative vigenti in ambito nazionale ed europeo (EC8).
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	ICAR/07
5. Costo originale del Programma:	381.000 €
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	157.620 €
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	67.555 €
8. Finanziamento totale:	225.175 €
9. Durata:	24 mesi

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Il presente progetto di ricerca PRIN_2007, coordinato dal Prof. M. Maugeri, si è proposto di esaminare il comportamento sismico di alcune opere e sistemi geotecnici mediante il confronto tra metodi pseudo-statici, dinamici semplificati e rigorosi. Le opere geotecniche esaminate sono: pendii, fondazioni superficiali e su pali, scavi profondi e gallerie.

L'obiettivo primario è stato quello di indirizzare la progettazione geotecnica verso l'analisi prestazionale, abbandonando progressivamente l'analisi basata sui meccanismi di collasso. Il progetto di ricerca si è proposto, dunque, in particolare di valutare i limiti di applicabilità dei metodi pseudo-statici nell'analisi agli stati limite. Gli strumenti "prodotti" consistono in metodologie progettuali di facile utilizzo. Tali metodologie scaturiscono da approfondite analisi condotte sulle opere geotecniche sopra elencate, avvalendosi dei risultati dedotti dall'utilizzo di metodi dinamici semplificati e/o rigorosi. Un secondo obiettivo riguarda la manutenzione della normativa Nazionale e di quella Europea (Eurocodice 8), anche attraverso il confronto dei risultati ottenuti con i metodi dinamici semplificati e rigorosi, con quelli ottenuti con i tradizionali metodi pseudo-statici. Un terzo obiettivo riguarda l'individuazione di criteri di armonizzazione tra la progettazione geotecnica e la progettazione strutturale, considerato che il terreno e la struttura costituiscono di fatto un unico sistema.

In particolare, per lo studio della stabilità dei pendii, ci si è posti come obiettivo la messa a punto e la validazione di metodi semplificati e affidabili. Sono stati presi in considerazione anche i metodi pseudo-statici, da applicare considerando registrazioni sismiche su modelli di sottosuolo teorici e realistici. I risultati e le relazioni ottenute sono state validate con analisi dinamiche semplificate 1D e complete 2D. La ricerca ha avuto, altresì, come obiettivo la definizione di modelli fisico-matematici di tipo dinamico per lo studio della risposta sismica di pendii attraverso la valutazione degli spostamenti permanenti. In particolare si è implementato un nuovo codice di calcolo per l'integrazione numerica dell'equazione del moto di un pendio sottoposto ad una azione sismica. Aspetto innovativo e di originalità è stato la valutazione degli effetti del comportamento ciclico dei terreni sulla risposta sismica. L'obiettivo finale è stato quello di fornire utili indicazioni sull'entità degli spostamenti permanenti indotti e sui criteri di progetto di tipo prestazionale.

Nell'ottica di una progettazione unitaria delle fondazioni assume particolare rilievo lo studio dei fenomeni di interazione dinamica terreno-struttura (DSSI). Tali fenomeni, se ignorati, possono dar luogo a significativi danni funzionali e/o strutturali, o viceversa a progettazioni anti-economiche. Uno degli obiettivi del programma di ricerca è stato, pertanto, quello di indagare sulla DSSI e, quindi, sugli spostamenti delle fondazioni e della struttura in elevazione indotti da eventi dinamici. A tal fine sono state effettuate analisi FEM, i cui risultati sono stati confrontati con risultati sperimentali. Sulla base dei risultati numerici e/o sperimentali è stata proposta una procedura meno sofisticata, basata sull'uso di impedenze dinamiche per modellare il macro-elemento fondazione-terreno interagente. Per quanto riguarda le fondazioni su pali, tra gli obiettivi del programma di ricerca c'è stato inizialmente quello di sistematizzare i risultati dei numerosi contributi acquisiti sull'interazione cinematica dei pali, recentemente presa in considerazione dal DM 14/1/2008. Successivamente l'attività di ricerca è stata indirizzata verso lo sviluppo di metodi di analisi di tipo analitico, numerico BDWM e FEM per la risposta del palo singolo e del gruppo sotto azioni sismiche a prescindere dalla struttura in elevazione. Quindi, ulteriore obiettivo raggiunto è stato quello di valutare l'effetto combinato dell'interazione inerziale, dovuta alla sovrastante struttura, e dell'interazione cinematica dovuta al cinematismo dei soli pali. Questo risultato è stato conseguito tramite analisi FEM e BDWM che schematizzano la

sovrastuttura come uno SDOF. Un importante risultato ottenuto è stato l'individuazione, in alcuni casi, di significativi momenti cinematici anche in testa ai pali, e non solo in corrispondenza di discontinuità stratigrafiche nel terreno, su cui si sono concentrate sostanzialmente tutte le ricerche antecedenti al presente progetto. Un aspetto innovativo dell'analisi dei sistemi completi: terreno+palo+sovrastuttura è stato quello di evidenziare con quale differenza temporale si manifestano i momenti inerziali e quelli cinematici e come sia erroneo semplicemente sommare i momenti massimi frutto di uno studio della sola interazione inerziale con i momenti massimi frutto di uno studio della sola interazione cinematica. Un obiettivo raggiunto è stato, altresì, quello di una rivisitazione dell'uso del metodo delle sottostrutture, che si basa su uno sdoppiamento brutale dell'interazione inerziale da una parte e dell'interazione cinematica dall'altra. Lo studio del comportamento delle opere di sostegno flessibili, per il sostegno degli scavi profondi, e delle gallerie ha avuto come obiettivo quello di indagare, in condizioni sismiche, sull'applicabilità dei metodi basati sull'approccio pseudo statico, e di proporre procedure più complesse, basate su modellazioni numeriche e costitutive avanzate, in grado di simulare, nel modo più accurato possibile, il comportamento non lineare ed irreversibile del terreno. Per quel che attiene alle opere di sostegno flessibili, tali procedure sono state confrontate con osservazioni condotte su modelli fisici realizzati in centrifuga. Si è fatto riferimento, in un primo momento, ai risultati di una sperimentazione in centrifuga condotta presso l'Università di Cambridge (UK), prima della presentazione del presente programma di ricerca. Quindi, sono state appositamente condotte due altre prove in centrifuga per paratie con più livelli di vincolo. Le analisi numeriche sono state condotte sia con riferimento alle prove su modelli a scala ridotta sia con riferimento a situazioni diverse riscontrabili in ambito urbano e ad alcune tipologie di "sottosuolo" rappresentative. Si è fatto uso di programmi di calcolo disponibili in commercio, utilizzando diversi modelli costitutivi, per riprodurre sia lo stato tensionale preesistente all'azione sismica, sia il comportamento in occasione dell'evento stesso. Il principale scopo del confronto dei modelli fisici e numerici sofisticati con le analisi pseudostatiche è stato quello di mettere in evidenza gli aspetti peculiari che rendono necessaria una modellazione più complessa del problema rispetto agli approcci semplificati, applicabili a tipologie di sottosuolo standard. In merito al tema delle gallerie, l'obiettivo principale della ricerca è stato quello di meglio comprendere le modalità con le quali l'evento sismico modifica il regime di sollecitazione agente nella struttura di rivestimento, sia durante il sisma che al termine dello stesso. La risposta sismica di una galleria può essere analizzata adottando approcci di tipo disaccoppiato o accoppiato, a seconda che lo studio della propagazione del segnale sismico ed il calcolo delle relative azioni sulla struttura di rivestimento siano effettuati in sequenza o contestualmente in un'unica analisi. Ulteriore obiettivo raggiunto è stato la valutazione degli effetti indotti sui risultati numerici dalla scelta del legame costitutivo con cui modellare il comportamento tanto del terreno quanto del rivestimento strutturale della galleria nelle analisi dinamiche complete; ovvero valutare in che modo l'immescarsi di deformazioni irreversibili nel terreno e/o la capacità dissipative del rivestimento della galleria influenzino la risposta sismica dell'intero sistema.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Nell'ambito del presente Programma di Ricerca PRIN 2007, coordinato dal prof. M. Maugeri, le varie UR, così come programmato in fase di presentazione del predetto programma, si sono occupate, singolarmente e sinergicamente, dei seguenti temi:

- 1) stabilità dei pendii: UR di Roma (capofila); UR di Catania;
- 2) fondazioni superficiali ed interazione terreno-struttura: UR di Catania (capofila); UR di Napoli;
- 3) fondazioni su pali: UR della Calabria (capofila); UR di Catania;
- 4) scavi e gallerie: UR di Roma (capofila); UR di Napoli.

Nel seguito viene descritta la ricerca eseguita, nonché i risultati ottenuti, dalle varie UR per ciascuno dei summenzionati temi di ricerca.

STABILITÀ DEI PENDII

La risposta dei pendii in campo sismico può essere studiata mediante analisi dinamiche complete, mediante i più semplici metodi degli spostamenti e, più frequentemente, mediante il ben noto metodo pseudo-statico. Sebbene l'approccio pseudo-statico e l'analisi agli spostamenti siano spesso considerati metodi alternativi uno all'altro, i valori del coefficiente sismico equivalente da utilizzare nell'analisi pseudo-statica vanno correlati ai valori dello spostamento permanente atteso, attraverso un criterio razionale che definisce un'equivalenza tra i risultati delle due analisi. L'approccio che ne consegue richiede affidabili modelli previsionali per la valutazione degli spostamenti attesi e la definizione di valori di soglia degli spostamenti che individuano possibili stati limite ultimi o di esercizio. L'attività di ricerca svolta nell'ambito del presente progetto PRIN_2007 è stata, quindi, inizialmente rivolta a istituire una corrispondenza tra i valori del coefficiente sismico da adoperare in un'analisi pseudo-statica e gli spostamenti permanenti, che costituiscono l'effettiva misura della prestazione sismica del pendio. L'UR di Roma si è occupata principalmente di effettuare una previsione degli spostamenti indotti in pendii caratterizzati da cinematicismi di collasso traslativi, diversi per dimensioni del corpo di frana e proprietà meccaniche e soggetti ad azioni sismiche di intensità confrontabile, ma caratterizzate da durata e contenuto in frequenza differenti. Mediante questi metodi è stato possibile valutare l'influenza sugli spostamenti subiti dal pendio della rigidità tangenziale del terreno, delle caratteristiche dell'azione sismica e della dimensione del volume di terreno potenzialmente instabile. In particolare, a parità di accelerazione critica e per ampiezza e durata fissate, gli effetti indotti dipendono essenzialmente dal rapporto fra le lunghezze d'onda tipiche dell'azione sismica e le dimensioni del volume di terreno considerato. La valutazione degli spostamenti permanenti di un pendio, a seguito di un sisma, è stata eseguita dall'UR di Catania utilizzando sia modelli semplificati, riconducibili al modello di Newmark (1965), sia modelli generalizzati che, rimuovono l'ipotesi di un legame costitutivo rigido-plastico e consentono di valutare la risposta sismica tenendo conto di alcuni fenomeni, quali le variazioni di rigidità e resistenza. Sono state ipotizzate superfici di scorrimento mistilinee, confrontando i risultati numerici con i risultati di prove su tavola vibrante, e ottenendo utili indicazioni sull'entità degli spostamenti permanenti indotti da un evento sismico, applicabili nei criteri di progettazione di tipo prestazionale.

La ricerca si è poi posta l'obiettivo di definire modelli fisico-matematici di tipo dinamico. In particolare, presso l'UR di Catania è stato implementato un nuovo codice di calcolo per l'integrazione numerica dell'equazione del moto di un pendio sottoposto a un'azione sismica, schematizzando il pendio come un sistema equivalente a un solo grado di libertà. Attraverso tale codice è stata eseguita un'analisi parametrica, i cui risultati sono stati validati attraverso confronti con risultati di studi analoghi di tipo teorico, numerico e sperimentale, nonché con case histories. L'attività di ricerca ha preso in esame differenti problematiche, tra loro strettamente connesse, che riguardano gli effetti dell'amplificazione del segnale sismico all'interno di un pendio, della componente verticale del moto sismico, del cambio di geometria del sistema con il procedere degli spostamenti, e la definizione di un valore del coefficiente sismico equivalente correlato alle soglie limite di spostamento del pendio.

I risultati ottenuti possono essere utilizzati per lo sviluppo d'indicazioni a carattere normativo e per la determinazione di correlazioni fra parametri sismici e geotecnici da utilizzare in analisi speditive.

FONDAZIONI SUPERFICIALI ED INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA

La progettazione geotecnica delle fondazioni superficiali è stata analizzata con riferimento a due tematiche: la valutazione della capacità portante e la valutazione dei cedimenti, ovvero dell'interazione dinamica terreno-struttura (DSSI). Soprattutto in relazione a quest'ultimo punto ci si è orientati verso un approccio che consenta di analizzare l'intero sistema terreno-struttura, privilegiando un'analisi prestazionale del sistema.

Per quel che attiene al primo punto, in particolare l'UR di Catania si è occupata di analizzare, per via sperimentale e numerica, il comportamento in condizioni prossime alla rottura di una fondazione superficiale su uno strato di terreno di limitato spessore e/o a fondazioni ricadenti in prossimità di un pendio. In quest'ultimo caso il carico limite della fondazione è gravemente ridotto dalla presenza del pendio, ma ancora di più dagli effetti di interazione inerziale e cinematica che insorgono allorché la fondazione è sottoposta a carichi di natura sismica. Tali condizioni hanno richiesto che i tradizionali fattori di capacità portante per il calcolo del carico limite della fondazione siano stati opportunamente rideterminati. Per via sperimentale il problema è stato analizzato effettuando presso il Laboratorio di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Catania prove di tipo statico su fondazioni superficiali in acciaio a piccola scala sollecitate mediante forze di diversa eccentricità e diversa inclinazione.

Per quel che attiene al secondo punto (DSSI), si è posta particolare attenzione sui seguenti punti: profilo stratigrafico del terreno di fondazione; variazione della profondità dello strato di base rigido; natura dell'input sismico; non-linearità, fenomeni di plasticizzazione ed incrudimento del terreno; scorrimento relativo terreno-fondazione e sollevamento parziale delle fondazioni; grado di affondamento della fondazione. Lo studio di tali aspetti è stato condotto mediante codici FEM, che hanno consentito analisi dinamiche complete, ovvero relative all'intero sistema terreno-fondazioni-sovrastuttura. I risultati sono stati confrontati con quelli sperimentali, già in possesso dell'UR di Catania, riguardanti prove su tavola vibrante precedentemente effettuate dai ricercatori dell'UR di Catania presso l'Università di Bristol, considerando ora un plinto di fondazione in calcestruzzo ora un telaio in acciaio in piccola scala poggiati su un deposito sabbioso. Il confronto tra risultati numerici e sperimentali ha consentito di affinare le procedure numeriche, così da poter utilizzare quest'ultime anche per studiare casi reali in vera grandezza. I risultati numerici e/o sperimentali sono stati, infine, confrontati con i risultati ottenuti con procedure semplificate; in particolare si è utilizzata il metodo delle impedenze (Gazetas, 1991).

Per quanto riguarda le strutture a scala reale analizzate, si è fatto riferimento sia a semplici strutture intelaiate, rappresentanti edifici per civile abitazione, sia ad edifici di importanza storica ed architettonica, quali la Cattedrale di Noto, sia, infine, ad edifici strategici, quali la Caserma dei VV.FF. di Catania.

In merito ai fenomeni di DSSI, l'UR di Napoli ha messo a punto un modello di calcolo di edificio intelaiato su fondazioni superficiali con il programma SEISMOSTRU per studiare l'influenza delle funzioni di impedenza sulla risposta dinamica dell'edificio e della fondazione. È stata dedicata molta attenzione alla calibrazione delle funzioni di impedenza (Mylonakis, 2005), che sono state definite per diversi modelli di sottosuolo, fra i quali, lo strato elastico su semispazio, lo strato elastico su

formazione indeformabile, e il doppio strato su base indeformabile. Sono stati inoltre ipotizzati diversi valori del rapporto fra lo spessore dello strato elastico e la larghezza caratteristica della fondazione. Sono stati considerati inoltre due valori del rapporto B/H , con B profondità del piano di posa della fondazione superficiale, ed H spessore del primo strato.

Quindi sono state condotte analisi dinamiche FEM in campo non lineare di alcuni modelli ricorrenti di edifici applicando il metodo delle sottostrutture, cioè modellando gli effetti della deformabilità fondazione-terreno considerando alla base dell'edificio le funzioni di impedenza dinamica definite nella prima fase di studio. I risultati (espressi in termini di spostamenti massimi d'interpiano, domanda di duttilità, forza di taglio alla base dell'edificio, sviluppo dei meccanismi di dissipazione) sono stati confrontati con quelli ricavati mediante analisi dinamiche non lineari di tipo convenzionale, condotte considerando l'edificio con base fissa. I risultati ottenuti possono essere adottati ai fini di una "manutenzione" delle normative e di un'armonizzazione delle progettazioni geotecnica e strutturale.

FONDAZIONI SU PALI

Per quel che attiene al tema delle fondazioni su pali obiettivo del presente programma di ricerca è stato quello di individuare gli aspetti peculiari riguardanti l'interazione inerziale e soprattutto cinematica che intervengono in concomitanza di un sisma.

A tal fine, sono stati sviluppati metodi di analisi di tipo analitico, e numerico (BDWF e FEM) per il palo singolo ed il gruppo di pali. Sono state, inoltre, proposte delle formulazioni semplificate di facile utilizzo da parte dei progettisti.

In particolare, l'UR di Catania ha messo a punto e confrontato tra loro tre diverse procedure: una "analitica", una numerica BDWF ed una numerica 3D-FEM completa.

La procedura "analitica" schematizza il palo come una trave elastica lineare connessa al terreno circostante mediante molle e smorzatori, distribuiti in maniera continua lungo il palo. Nella procedura BDWF il palo è suddiviso in conci e per ogni concio è definita un'interazione concio-terreno, mediante molla e smorzatore. In questa procedura, così come nella precedente, il moto sismico del terreno è valutato a monte mediante un'analisi di risposta sismica locale effettuata a parte. La procedura FEM si fonda sulla discretizzazione in elementi finiti sia del palo che del terreno con esso interagente. La sollecitazione è data, in tal caso, alla base del modello palo-terreno mediante leggi di spostamento, rappresentative di molteplici recenti registrazioni accelerometriche. Si è, altresì, indagato sull'interazione dinamica completa, modellando la presenza di una sovrastruttura con uno SDOF. Lo studio dell'interazione dinamica completa (inerziale e cinematica), resa possibile dai codici FEM ha messo in luce, facendo un significativo passo in avanti rispetto alle ricerche condotte nell'ambito dei precedenti progetti di ricerca, importanti momenti flettenti cinematici anche alla testa del palo, momenti che andandosi a sommare a quelli inerziali, potrebbero ben spiegare i numerosi danni riscontrati alla testa di molti pali di fondazione.

Parallelamente, l'UR della Calabria ha condotto una serie di simulazioni numeriche per analizzare il comportamento dei pali di fondazione utilizzando metodi di calcolo appositamente sviluppati nella propria sede oltre a software commerciali. E' stato sviluppato, per l'analisi del palo singolo, un modello a masse concentrate in modo da analizzare sia la propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo, schematizzato con una serie di strati omogenei orizzontali, sia la risposta sismica del palo, connesso al terreno da molle e smorzatori. La procedura consente di tenere conto del comportamento non lineare e isteretico del terreno, per mezzo di un legame costitutivo di tipo iperbolico, dello smorzamento geometrico delle onde sismiche nel terreno, della eventuale presenza di una sovrastruttura, schematizzata con un oscillatore elementare. Il metodo proposto è stato validato sulla base di confronti con risultati teorici che sperimentali.

Dalle analisi effettuate, in condizioni elastiche, si è potuto osservare che nei casi più critici, generalmente riscontrati allorché il periodo proprio dell'accelerogramma tende al periodo fondamentale del deposito di terreno, nel palo possono insorgere delle deformazioni per flessione pari o superiori allo 0.1%. Sono state, altresì, svolte analisi lineari 3D col codice ANSYS di pali isolati ed in gruppo, in terreni omogenei e stratificati. Da tale lavoro discendono alcune indicazioni utili ai progettisti per il dimensionamento dei pali soggetti a eventi sismici. Sono stati indagati i diversi fattori che accentuano l'effetto filtro operato dai pali sulle onde sismiche: è stata, quindi, trovata una regola semplice che consente di capire in quali casi è possibile trascurare tale effetto e riferirsi al segnale di campo libero. Si è, infine, giunti alla determinazione di un semplice metodo per stimare lo sfasamento tra azioni cinematiche e inerziali.

Inoltre, è stata analizzata la risposta sismica delle fondazioni su pali inclinati, sulla base di analisi FEM 3D. Con riferimento a due gruppi di pali, rispettivamente costituiti da due e sei pali, la risposta sismica dei pali inclinati viene sistematicamente raffrontata con quella di analoghi pali verticali. Si deduce che sotto sollecitazioni sismiche, i pali inclinati conferiscono tendenzialmente una maggiore rigidità rispetto ai corrispondenti pali verticali, anche se, quantitativamente, le differenze sono abbastanza contenute. I pali inclinati nei casi analizzati richiamano più elevati valori del momento flettente, il che rende ragione delle rotture nei pali osservate in sito. Circa l'influenza del tipo di connessione palo-plinto, con riferimento a gruppi con due pali, si è constatato, in accordo con recenti risultati di letteratura, che essa dipende dalle caratteristiche della sovrastruttura. Una connessione palo-plinto che consente la rotazione riduce, in presenza di sovrastruttura tozza, sia i momenti che le forze assiali nei pali, e ciò segnatamente nei pali inclinati. Al contrario, nel caso di struttura in elevazione snella, la connessione a incastro è quella che converrebbe realizzare per ridurre momenti e sforzi normali.

Infine, è stato messo a punto un approccio approssimato sulla base delle semplici soluzioni di stato stazionario relative alle funzioni di amplificazione delle onde sismiche nel sottosuolo, e di pochi parametri "sintetici" dei terremoti, facilmente reperibili. Da questi studi emerge che per la stima, in prima approssimazione, del momento cinematico nel palo, oltre ai parametri geometrici e meccanici che caratterizzano il sistema palo-terreno, entrano in gioco fattori quali: il rapporto tra il periodo fondamentale T del deposito di terreno e il periodo medio T_m del terremoto; l'intensità dello spettro di risposta S_I , messa in relazione alla velocità equivalente $V_{s,30}$ delle onde di taglio nel sottosuolo.

SCAVI PROFONDI E GALLERIE

Il monitoraggio di opere di sostegno esistenti e alcuni studi sperimentali hanno mostrato l'estrema vulnerabilità di molti scavi nei riguardi di terremoti di moderata o elevata intensità, durante i quali si sono osservati sia la rottura degli elementi strutturali sia l'accumulo di spostamenti permanenti elevati da parte delle opere. E', dunque, di cruciale importanza la comprensione del comportamento esibito dalle strutture di sostegno in condizioni dinamiche e lo sviluppo di metodologie di progetto adeguate.

Oggi, la modellazione numerica rappresenta l'unico strumento in grado di fornire informazioni sul comportamento tensio-deformativo di queste opere. Tuttavia, le numerose incertezze associate alla modellazione numerica dei fenomeni di interazione dinamica tra terreno e struttura, tra le quali la più importante è la scelta di un modello costitutivo adeguato per la descrizione del comportamento del terreno sottoposto a sollecitazioni cicliche, rendono di cruciale importanza la necessità di disporre di dati attraverso cui verificare la bontà dei modelli costitutivi adottati e le capacità previsionali delle analisi numeriche. Poiché i dati relativi al monitoraggio di opere in vera grandezza sono pochi, lo studio del comportamento delle opere di sostegno flessibili in condizioni sismiche si basa soprattutto sui dati forniti da prove di laboratorio su modelli fisici in scala ridotta, eseguite in centrifuga o su tavola vibrante.

Nell'ambito di questo tema di ricerca l'UR di Napoli ha condotto analisi di interpretazione dei risultati sperimentali, già disponibili, su modelli fisici in centrifuga di modelli di paratie (libere o con un solo livello di ancoraggio in testa) Le prove sono state condotte nella centrifuga geotecnica del Cambridge University Engineering Department.

I risultati principali di tali prove si possono sintetizzare nei seguenti punti: 1. Le amplificazioni in termini di accelerazioni massime sono solo leggermente maggiori in prossimità delle paratie rispetto a quelle in campo libero. 2. Le amplificazioni in termini di intensità di Arias sono molto maggiori di quelle in termini di accelerazione massima e più significative per quei terremoti la cui frequenza nominale è prossima alla frequenza fondamentale dello strato. 3. Tra due terremoti successivi si registrano incrementi di spostamenti solo se il terremoto precedente ha un valore di accelerazione massima più elevata. Nell'ambito del presente progetto sono state svolte due prove in sabbia asciutta, la prima su una coppia di paratie con un solo livello di puntoni, la seconda su un modello identico con un livello aggiunto alla profondità di scavo.

Parallelamente, l'UR di Napoli ha condotto analisi numeriche complete e semplificate con il codice PLAXIS per paratie libere e con un solo livello di ancoraggio. Gli accelerogrammi utilizzati sono stati selezionati dal database di Scasserra et al. (2006), scalati a 0.35g. I modelli costitutivi utilizzati sono: a) elastico perfettamente plastico con superficie di snervamento alla Mohr-Coulomb; b) elasto-plastico con incremento isotropo: La paratia è stata schematizzata come elastica-lineare. L'UR di Roma si è occupata della simulazione numerica di alcune delle prove in centrifuga. Si è adottato un modello 2D-FDM. Per la sabbia è stato utilizzato il modello costitutivo di Andrianopoulos et al. (2010), particolarmente adatto a riprodurre il comportamento ciclico dei terreni granulari in corrispondenza di piccole, medie e grandi deformazioni e per diversi valori dello stato tensionale e della densità iniziali. I risultati forniti dalle analisi numeriche sono in ottimo accordo con i dati sperimentali. Si è osservato che gli spostamenti permanenti e le sollecitazioni residue nelle paratie sono principalmente dovute ad una progressiva mobilitazione della resistenza passiva nel terreno durante i transitori dinamici. L'elaborazione delle prove in centrifuga e le successive analisi numeriche, infine, hanno mostrato che il metodo di Newmark non sembra direttamente applicabile al caso delle paratie.

Sono state, altresì, condotte analisi numeriche dinamiche di tipo parametrico, indirizzate alla comprensione del comportamento delle paratie, a sbalzo o con livello di vincolo, soggette ad azioni sismiche di intensità elevata. Le analisi sono state condotte con il codice FLAC, utilizzando per il terreno un modello costitutivo non lineare e isteretico, accoppiato a un criterio di resistenza di Mohr-Coulomb con legge di flusso non associata. In queste analisi, si sono applicate storie temporali di accelerazione, derivanti da registrazioni di eventi reali, al bedrock di un deposito di terreni a grana grossa asciutto. Le analisi hanno mostrato che le azioni sismiche, intervenendo su uno stato tensionale iniziale nel quale la resistenza del terreno è già parzialmente mobilitata, producono istantanei e successivi raggiungimenti della resistenza disponibile e perciò l'attivazione di meccanismi plastici, ai quali corrisponde un accumulo di spostamenti permanenti. A parità di altre condizioni, le soglie di accelerazione che corrispondono al raggiungimento della resistenza disponibile aumentano all'aumentare della profondità di infissione della paratia. Sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile delineare un criterio chiaro e speditivo per il dimensionamento sismico di paratie a sbalzo e con un livello di vincolo, basato sulla definizione di un'accelerazione critica per il sistema e sulla valutazione degli spostamenti permanenti (prestazione). Una parte dello studio è stata, infine, dedicata alla possibilità che durante il sisma si attivino meccanismi plastici nella paratia, si è così assegnato alla paratia un legame momento-curvatura di tipo elastico-perfettamente plastico.

L'attività di ricerca sulle gallerie è consistita nel confronto tra differenti approcci di analisi, da quelli semplificati alle analisi dinamiche complete, per lo studio della risposta sismica trasversale di gallerie superficiali. L'obiettivo principale della ricerca è stato quello di meglio comprendere le modalità con le quali l'evento sismico modifica il regime di sollecitazione agente nella struttura di rivestimento, sia durante il sisma che al termine dello stesso. La risposta sismica di una galleria può essere analizzata adottando approcci di tipo disaccoppiato o accoppiato, a seconda che lo studio della propagazione del segnale sismico ed il calcolo delle relative azioni sulla struttura di rivestimento siano effettuati in sequenza o contestualmente in un'unica analisi. In merito all'approccio disaccoppiato, è stato approfondito l'aspetto relativo alla previsione numerica della risposta sismica locale attraverso codici di calcolo FEM. In dettaglio, si è individuata una nuova procedura di calibrazione dei parametri visco-elastici tale da rendere equivalente, in condizioni monodimensionali, la soluzione ottenuta da analisi FEM a quella convenzionale basata su analisi visco-elastiche lineari equivalenti. Tale studio è da considerarsi propedeutico alla fase successiva dell'attività di ricerca che è stata dedicata agli approcci dinamici completi. In tal caso sono stati studiati casi ideali di gallerie superficiali assoggettate a sismi di differenti caratteristiche in termini di intensità e contenuto in frequenza, adottando differenti ipotesi costitutive caratterizzate da crescente complessità sia per la descrizione del comportamento meccanico del terreno che per quello del materiale costituente la struttura di rivestimento. Una prima serie di risultati ha evidenziato che le sollecitazioni agenti nella struttura di rivestimento evolvono durante il sisma in modo differente in relazione alla relazione costitutiva assunta per il terreno: l'introduzione della plasticità tende a ridurre i picchi di sollecitazione indotti nel rivestimento durante il sisma, rispetto a quelli determinabili nell'ipotesi di comportamento visco-elastico, ma implica anche, in ragione dell'accumulo di deformazioni irreversibili nel terreno circostante la galleria, la modifica permanente delle sollecitazioni riscontrabile al termine dell'evento sismico. Il passo successivo è stato quello di esaminare il ruolo dell'ipotesi costitutiva adottata per il rivestimento: in tal senso si è confrontata la risposta già ottenuta con quella relativa ad ipotesi di comportamento visco-elasto-plastico per gli elementi strutturali, evidenziando il ruolo della capacità dissipativa della struttura di rivestimento.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Nel corso della ricerca non sono stati riscontrati significativi problemi

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo)
TOTALE	
da personale universitario	264
altro personale	148
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	86

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	7	6	<ul style="list-style-type: none"> - XIII Convegno Anidis: l'Ingegneria Sismica in Italia, 2009. Bologna, 28 Giugno - 2 Luglio, 2009. - Convegno Nazionale Geosintetici: Normativa Sismica e Progettazione delle Opere in Terra Rinforzata. Bologna, 28/10/2009. - XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica: Innovazione Tecnologica nell'Ingegneria Geotecnica, Napoli, 22-24/6/2011. - XXIII Convegno Nazionale Geosintetici, Bologna, Ottobre 2011- - XIV CONvegno ANIDIS: l'Ingegneria Sismica in Italia, Bari, 18-22/09/2011.
all'estero	9	12	<ul style="list-style-type: none"> - Plasticity'09. St. Thomas, USVI, USA, 3-8/1/2009. - Conference On Earthquake Resistant Engineering Structures; ERES 2009. Cyprus, 11-13/5/2009. - Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. Tokyo, 15-18/06/2009. - Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09. Roma, 21-24/06/2009. - Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference. Alexandria, Egypt, 2-3/10/2009. - V Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthq. Engng and Soil Dynamics and Symp. in honour of Prof. I.M. Idriss. San Diego, California, 24-29/5/2010. - Conf. on: from Research to Design in Europe Practice. Bratislava, Slovak Republik, 2-4/6/2010. - 5th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile, 10-13/1/2011. - 7th Int. Symp. on "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Roma, 16-18/5/2011. - 8th Int. Conf. on Earthquake Resistant Engineering Structures, Chianciano Terme, 7-9/9/2011. - XV Europ. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Athens. 12-15/9/2011. - Workshop ERTC-12 on Geotechnical Application of EC8 Athens, Settembre 2011. - 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics, 10-14/12/2012 Bangkok, Thailand. - 7th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, Chicago, 16-21/9/2013. - 10th International Conference on Geosynthetics, Berlino, 21-25/9/2014
TOTALE	16	18	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	4	<ul style="list-style-type: none"> - Callisto L., Rampello S., Fargnoli P.; 2008; <i>Studio del comportamento sismico di una diga in terra con metodi disaccoppiati</i>; Rivista: <i>Rivista Italiana di Geotecnica</i>; Volume: 52; pp.: 38-53 - CAIRO R., DENTE G., SICA S., SIMONELLI A.L. (2010). <i>Soil-pile kinematic interaction: from research to practice</i>. <i>RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA</i>, ISSN: 0557-1405 - Dente A.; 2010; <i>Seismic response of group-pile foundation with inclined piles</i>; Rivista: <i>Rivista Italiana di Geotecnica</i> (sottoposto a pubblicazione) - Di Laora R., Mandolini A.; 2009; <i>Some aspects of the design of pile foundations under seismic motion</i>; Rivista: <i>Rivista Geotecnica Italiana</i>, accettato per la pubblicazione
su riviste straniere con referee	16	<ul style="list-style-type: none"> - DE SANCTIS L., MAIORANO R.M.S., AVERSA S. (2010). <i>A method for assessing kinematic bending moments at the pile head</i>. <i>EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS</i>, vol. 39(4); p. 375-397, ISSN: 0098-8847 - MAIORANO R.M.S., DE SANCTIS L., AVERSA S., MANDOLINI A. (2009). <i>Kinematic response analysis of piled foundations under earthquake excitation</i>. <i>CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL</i>, ISSN: 0008-3674 - de Sanctis L., Maiorano R.M.S.; 2009; <i>Earthquake induced kinematic bending moments on fixed-head piles</i>; Rivista: <i>Proc. Int. Conf.; Volume: 'PBD in Earthquake Geot. Eng.'</i>; ISBN: 978-0-415-55614-9 - Amorosi A., Boldini D.; 2009; <i>Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils</i>; Rivista: <i>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</i>; Volume: 29; pp.: 1059-1072 - Amorosi A., Boldini D., Elia G.; 2010; <i>Finite element modelling of seismic ground response</i>; Rivista: <i>Computers and Geotechnics</i>; Volume: 37; pp.: 515-528 - Callisto L.; 2010; <i>A factored strength approach for the limit states design of geotechnical structures</i>; Rivista: <i>Canadian Geotechnical Journal</i>; Volume: 47; pp.: 1011-1023 - Callisto L., Soccodato F.; 2010; <i>Seismic design of flexible cantilevered retaining walls</i>; Rivista: <i>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</i>; Volume: 136; pp.: 344-354 - Rampello S., Cascone E., Grosso N.; 2009; <i>Evaluation of the seismic response of a homogeneous earth dam</i>; Rivista: <i>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</i>; Volume: 29; pp.: 782-798 - Viggiani GMB, de Sanctis L.; 2009; <i>Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment</i>; Rivista: <i>Engineering Geology Special Publications</i>; Volume: 22; pp.: 215-240 - Elia G., Amorosi A., Chan A.H.C., Kavvas M.J.; 2010; <i>Fully coupled dynamic analysis of an earth dam</i>; Rivista: <i>Géotechnique</i>; accepted for publication - Conti R., de Sanctis L., Viggiani GMB; 2010; <i>Numerical modelling of diaphragm walls in sand: Part I</i>; Rivista: <i>Géotechnique</i>; submitted for publication - Conti R., de Sanctis L., Viggiani GMB; 2010; <i>Numerical modelling of diaphragm walls in sand: Part II</i>; Rivista: <i>Géotechnique</i>; submitted for publication - Maiorano R.M.S., de Sanctis L., Aversa S., Mandolini A.; 2009; <i>Kinematic response analysis of piled foundations under seismic excitation</i>; Rivista: <i>Canadian Geotechnical Journal</i>; Volume: 46 - ABATE G., MASSIMINO M.R., MAUGERI M., D. MUIR WOOD; 2010; <i>Numerical modelling of shaking table test for soil-foundation-superstructure interaction by means of a soil constitutive model implemented in a FEM code</i>; Rivista: <i>Geotechnical and Geological Engineering</i>; Volume: 28; pp.: 37-59; ISBN: 09603182; DOI: 10.1007/s10706-009-9275-y (ONLINE) - CASTELLI F., MAUGERI M.; 2009; <i>A Simplified Approach for the Seismic Response of a Pile Foundation</i>; Rivista: <i>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</i>; Volume: 135; pp.: 1440-1451; ISBN: 1090-0241/2009/10-1440-1451; October 1, 2009 - CASTELLI F., MOTTA E.; 2009; <i>Bearing Capacity of Strip Footings Near Slopes</i>; Rivista: <i>Geotechnical and Geological Engineering Journal</i>; Volume: 28; pp.: 187-198
su altre riviste italiane	0	
su altre riviste straniere	0	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	23	<ul style="list-style-type: none"> - AVERSA S., DE SANCTIS L., MAIORANO R.M.S. (2010). <i>Simplified procedures for kinematic bending moments of fixed-head piles</i>. In: <i>From Research to Design in Europe Practice</i>. Bratislava, Slovak Republik, 2-4 June. - AVERSA S., L. CALLISTO, R. CONTI, R.M.S. MAIORANO, G. MADABUSHI, F. SOCCODATO E G. VIGGIANI (2008). <i>Seismic soil-structure interaction for flexible retaining walls</i>. In: <i>MERCEA '08 2008 Seismic Engineering International Conference commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake</i>. Reggio Calabria, 8-11 July, AIP American Institute of Physics, ISBN/ISSN: 978-0-7354-0542-4 - AVERSA S. (2008). <i>Preserving cities and monuments</i>. In: <i>Geotechnical Engineering in Urban Environments</i>. Madrid, 24-27 september 2007, ROTTERDAM: Millpress, vol. 5, p. 453-462, ISBN/ISSN: 978 90 5966 055 7 - BURGHIGNOLI A., DI PAOLA F., JAMIOLKOWSKI M., SIMONACCI G. (2010). <i>New Rome metro line C: approach for safeguarding ancient monuments</i>. In: <i>Geotechnical Challenges in Megacities</i>. Moscow - Russia, 7-10 giugno 2010 - Ausilio E., Costanzo A., Silvestri F., Tropeano G.; 2009; <i>Evaluation of seismic displacements of a natural slope by simplified methods and dynamic analyses</i>; I International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering: from case history to practice, Tokyo - Cairo R., Chidichimo A.; 2010; <i>Nonlinear analysis for pile kinematic response</i>; 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (accettato per la pubblicazione) - Di Laora R., Mandolini A.; 2009; <i>Some remarks on the kinematic vs. inertial interaction for piled foundations</i>; Proc. of the Int. Conf. 'Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo - Di Laora R., Mandolini A., Mylonakis G.; 2010; <i>Kinematic bending moments at pile head in layered soil</i>; V ICEGE, Santiago, Chile, (accepted) - Tropeano G., Ausilio A., Costanzo A.; 2010; <i>Non-linear coupled approach for the evaluation of seismic slope displacements</i>; V International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile, (sottoposto a pubblicazione) - CASTELLI F., LENTINI V., MAUGERI M. (2010). <i>A simplified approach for the evaluation of kinematic pile bending</i>. In: <i>Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics</i>. San Diego, May 23-29, 2010 - MAUGERI M., MASSIMINO M.R. (2010). <i>Physical and modeling of soil-structure interaction</i>. In: <i>Proc. of International Conference: 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake</i>. Messina and Reggio Calabria, July 8-11, 2008. - MAUGERI M., MOTTA E., RACITI E. (2010). <i>Kinematic interaction for piles embedded in layered soils: the effect of a shear modulus linearly increasing with depth</i>. In: -. Moscow, 7-10 June 2010 - ABATE G., MAUGERI M., MUIR WOOD D. (2009). <i>Adequate complexity for dynamic geotechnical modelling</i>. In:

		<p><i>Proc. Plasticity'09. St. Thomas, USVI, USA, January, 3-8, 2009, -:-</i></p> <p>- ABATE G, MASSIMINO M.R, MAUGERI M. (2009). <i>Effects of DSSI on Noto Cathedral behaviour: evaluation by means of FEM analyses. In: Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09. Roma, June 21-24, 2009, LONDON: Taylor & Francis Group, vol. 1, p. 87-93, ISBN/ISSN: 978-0-415-55803-7</i></p> <p>- ABATE G, MASSIMINO M.R, MAUGERI M. (2009). <i>Effects of the shallow foundation embedment in the seismic performance of foundation-soil system. In: Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. Tokyo, 15-18 June 2009, LONDON: Taylor & Francis Group, p. 811-818, ISBN/ISSN: ISBN 978-0-415-55614-9</i></p> <p>- MAUGERI M., MOTTA E, RACITI E (2009). <i>Seismic response of single piles due to kinematic interaction. In: Proc. Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference. Alexandria, Egypt, 2-3 October 2009</i> Editors M. Sakr & A. Ansal.</p> <p>- BIONDI G, CASCONI E, MAUGERI M. (2009). <i>Equivalent and critical acceleration coefficients for displacement-based seismic analysis of gravity retaining walls. In: Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design. Tokyo, 15-18 June 2009, LONDON: Kokusho, Tsukamoto & Yoshimine (eds), p. 571-580, ISBN/ISSN: ISBN 978-0-415-55614-9</i></p> <p>- GRASSI F., MASSIMINO M. R.; 2009; <i>Evaluation of kinematic bending moment in pile foundations using the finite element approach; Rivista: Proc. Conference On Earthquake Resistant Engineering Structures; ERES 2009. Cyprus, 11-13 may, 2009</i></p> <p>- GRASSI F., MASSIMINO M. R.; 2010; <i>Preliminary Results Of 3d Soil-Pile Fem System Under Earthquake Loading; Rivista: Proc. Int. Conf. On Recent Advances In Geotechnical Earthquake Engineering And Soil Dynamics; ISBN: 1-8870009-16-7; San Diego May 23-29, 2010</i></p> <p>- ARDITA D, MAUGERI M., MOTTA E, RACITI E (2010). <i>A parametric study on soil-pile kinematic interaction in layered soils. In: Proc of V Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthq. Engng and Soil Dynamics and Symp. in honour of Prof. I.M. Idriss. San Diego, California, May 24-29 2010</i></p> <p>- MASSIMINO M.R., SCUDERI G.; 2009; <i>Response of a soil-structure system to different seismic inputs; Rivista: Proc. Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference; 2-3 October 2009 in Alexandria, Egypt</i></p> <p>- MAUGERI M., MASSIMINO M.R., ABATE G.; 2009; <i>Soil structure interaction for seismic improvement of Noto Cathedral (Italy); Rivista: Proc. Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference; 2-3 October 2009 in Alexandria, Egypt</i></p> <p>- MAUGERI M., MOTTA E., RACITI E., ARDITA D.; 2009; <i>Kinematic interaction of a single pile in heterogeneous soil; Rivista: Proc. Conference On Earthquake Resistant Engineering Structures; ERES 2009. Cyprus, 11-13 may, 2009</i></p>
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	6	<p>- AVERSA S., DE SANCTIS L. E MAIORANO R.M.S (2009). <i>Un approccio semplificato per la previsione dei momenti d'interazione cinematica nei pali. In: Anidis 2009. Bologna, 28 Giugno - 2 Luglio</i></p> <p>- CALLISTO L, AVERSA S. (2008). <i>Dimensionamento di opere di sostegno soggette ad azioni sismiche. In: Opere Geotecniche in Condizioni Sismiche. Torino, 2-3 dicembre 2008, BOLOGNA: PATRON EDITORE, vol. 1, ISBN/ISSN: 9788855530057</i></p> <p>- Di Laora R., Mandolini A., de Sanctis L.; 2009; <i>Modifica del segnale sismico alla base di una struttura dovuta alla presenza dei pali; XIII convegno ANIDIS, Bologna</i></p> <p>- MAUGERI M., BIONDI G (2009). <i>Progettazione prestazionale di opere in terra rinforzata. In: Atti XXII Convegno Nazionale Geosintetici: Normativa Sismica e Progettazione delle Opere in Terra Rinforzata. Bologna, 28 ottobre 2009., BOLOGNA: Patron Editore</i></p> <p>- BANDINI V., CASCONI E., BIONDI G.; 2009; <i>Analisi agli spostamenti di un pendio con superficie di scorrimento mistilinea: confronto con risultati di prove su tavola vibrante; Rivista: IARG2009; Roma 9-11 settembre 2009</i></p> <p>- BIONDI G., MAUGERI M., RIGANO L.; 2009; <i>Analisi agli spostamenti per la valutazione del coefficiente sismico equivalente; Rivista: Atti XXII Convegno Nazionale Geosintetici: Normativa Sismica e Progettazione delle Opere in Terra Ri; Bologna 28 ottobre 2009</i></p>
rapporti interni	0	
brevetti depositati	0	
TOTALE	49	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 20/12/2010 12:29

Firma

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.