

Analisi preliminare della risposta dinamica locale del sottosuolo di Palermo

G. BOSCO *

SOMMARIO: Si espongono i risultati di uno studio preliminare della risposta dinamica locale del sottosuolo di Palermo. Il modello di calcolo utilizzato è basato sull'analisi della propagazione monodimensionale verticale delle onde di taglio in un mezzo non lineare viscoso. Sono state analizzate alcune situazioni che possono ritenersi tipiche sotto il profilo geotecnico. I risultati ottenuti consentono di trarre alcune conclusioni di carattere generale sull'influenza della variazione della costituzione del sottosuolo e delle proprietà meccaniche dei terreni.

1. Introduzione

La ricerca degli stati di tensione e deformazione indotti nel complesso terreno-struttura da azioni dinamiche ha destato da tempo l'attenzione dei cultori di ingegneria geotecnica e strutturale. Il problema è particolarmente complesso per l'influenza di numerosi fattori, relativi alla geometria, alle caratteristiche fisico-meccaniche del terreno e del manufatto, al tipo di carichi applicati e, inoltre, per il comportamento dei materiali in presenza di azioni dinamiche, che non può essere descritto mediante semplici modelli costitutivi.

La soluzione del problema presenta ancora notevoli difficoltà e può essere ottenuta solo con riferimento a schemi molto semplificati.

Nel caso particolare delle azioni sismiche, le tensioni e le deformazioni sono causate, prevalentemente, da onde di taglio che si propagano in direzione verticale dal tetto della formazione di base alla superficie del terreno (fig. 1). È noto, inoltre, che le caratteristiche di un'onda incidente vengono modificate, in misura notevole, dalle proprietà fisico-meccaniche del mezzo nel quale essa si propaga. Nel caso di onde sismiche, l'accelerazione massima ed i contenuti energetici alle diverse frequenze dell'accelerogramma $\ddot{u}_s(t)$, che si registra sui terreni della coltre superficiale, possono essere molto diversi da quelli dell'accelerogramma $\ddot{u}_b(t)$ al tetto della formazione di base (bedrock) definita convenzionalmente come la formazione nella quale, per la minore deformabilità del

terreno, le onde di taglio si propagano con velocità $V_s > \sim 1000$ m/sec. Quindi, le tensioni e le deformazioni indotte nel terreno e nella struttura da un sisma, non possono essere valutate con sufficiente approssimazione, se si trascura l'influenza delle proprietà meccaniche dei terreni superficiali sulla propagazione delle onde sismiche. Le caratteristiche di tali onde, infatti, si modificano notevolmente nel moto di propagazione dal tetto della formazione di base alla superficie del terreno.

Inoltre, è stato posto in evidenza che nel caso di edifici civili od industriali convenzionali gli incrementi di tensioni e deformazioni indotti in un terreno da azioni sismiche non si modificano in misura apprezzabile per la presenza della struttura. È lecito, in tale caso, assimilare l'accelerogramma $\ddot{u}_s^*(t)$, alla base della struttura, a quello $\ddot{u}_s(t)$, che si registra in « campo libero » (fig. 1).

Per tale motivo molti studiosi affrontano il problema della determinazione delle tensioni e delle deformazioni indotte da sollecitazioni sismiche nel terreno e nella struttura con riferimento allo schema semplificato di fig. 2, nell'ipotesi che gli effetti dell'interazione fra il terreno e la struttura possano essere trascurati.

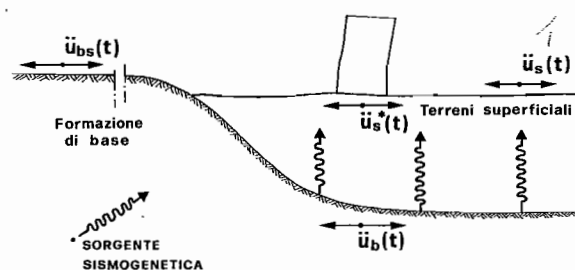


Fig. 1. - Schema fisico di riferimento per lo studio delle tensioni e delle deformazioni nel complesso terreno-struttura in presenza di azioni sismiche.

* Dott. Ing. Giovanni Bosco, Master of Science, University of California Berkeley.

Il presente studio rientra in un programma di ricerca svolto con la guida del prof. Ruggiero Jappelli del Dipartimento di Ingegneria civile Edile, Seconda Università di Roma.

Le azioni sismiche vengono schematizzate mediante un'accelerazione variabile nel tempo, $\ddot{u}_b(t)$, che rappresenta il terremoto di progetto al tetto della formazione di base. La soluzione è ottenuta risolvendo separatamente il problema della determinazione della risposta dinamica locale ed analizzando successivamente la risposta dinamica della struttura. Più precisamente, si ricavano dapprima le tensioni e le deformazioni nel terreno sotto l'azione della $\ddot{u}_b(t)$ e si determina l'andamento nel tempo dell'accelerazione in superficie $\ddot{u}_s(t)$. Successivamente, si ricercano le tensioni e le deformazioni nella struttura sollecitata dall'azione sismica superficiale $\ddot{u}_s(t)$.

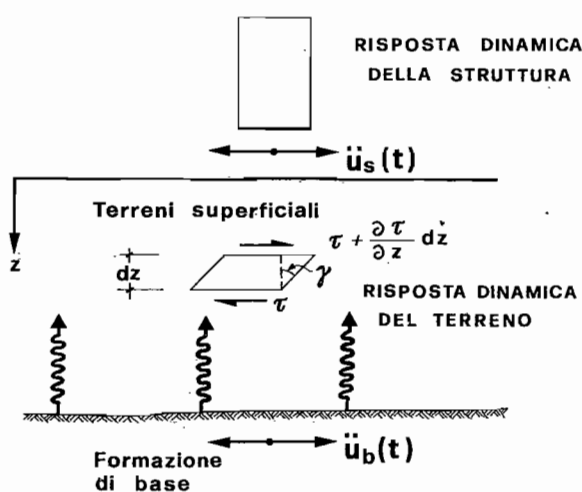


Fig. 2. - Tensioni e deformazioni nel terreno sotto l'azione di onde di taglio.

Dalla conoscenza delle caratteristiche dell'accelerogramma $\ddot{u}_s(t)$ è possibile, inoltre, trarre alcune indicazioni di carattere generale sull'entità delle sollecitazioni in strutture con diverse caratteristiche costruttive. Per tale motivo la valutazione della risposta dinamica locale rappresenta un importante passo per la soluzione del più ampio problema della zonazione sismica di un sito.

Il sottosuolo della città di Palermo è costituito di rocce sciolte e di rocce lapidee con caratteristiche geotecniche variabili entro intervalli molto ampi. Uno studio generale sulla risposta dinamica del sottosuolo richiederebbe, pertanto, un gran numero di dati, al momento non disponibili, sulle proprietà dinamiche dei terreni.

Ciononostante si è ritenuto utile intraprendere un'analisi preliminare del problema con riferimento ad alcuni profili schematici tipici.

L'analisi è stata condotta utilizzando un programma di calcolo automatico [SCHNABEL e LYSMER, 1972], che permette, nota l'azione sismica al tetto della formazione di base, di determinare l'andamento nel tempo dell'accelerazione, dello sforzo di taglio e dello scorrimento tangenziale, in funzione della profondità dal piano di campagna.

Le sollecitazioni sismiche sono state valutate con riferimento ad un terremoto di magnitudo $M = 6,5$ localizzato nella Valle del Belice, nell'ipotesi che la sorgente di rilascio energetico si trovi ad una distanza di 60 Km circa dalla città.

I risultati ottenuti consentono di trarre alcune conclusioni che si ritengono utili per orientare lo sviluppo delle ricerche sull'argomento.

2. Modello di calcolo

Il problema della risposta dinamica locale è stato affrontato da molti studiosi e la letteratura geotecnica è ricca di schemi e modelli di calcolo.

Il modello più frequentemente adottato si basa sull'analisi della propagazione monodimensionale delle onde di taglio in un mezzo elastico, omogeneo ed isotropo, dotato di viscosità. I calcoli vengono sviluppati nell'ipotesi che le tensioni e le deformazioni nel terreno siano indotte da onde di taglio, che si propagano nella direzione verticale dal tetto della formazione di base alla superficie.

In tali condizioni un elemento di terreno di spessore dz si deforma come indicato nella fig. 2. L'equazione del moto

$$m\ddot{u} = F \quad (1)$$

applicata all'elemento dz di terreno assume la forma seguente:

$$\rho dz \ddot{u} = \frac{\partial \tau}{\partial z} dz \quad (2)$$

in cui ρ è la densità.

Se la relazione fra lo sforzo di taglio τ e lo scorrimento tangenziale γ si esprime con

$$\tau = G\gamma \quad (3)$$

in cui G è il modulo di elasticità tangenziale del terreno, funzione di γ per la non linearità di questo, la (2) diviene

$$\rho \ddot{u} = G \frac{\partial \gamma}{\partial z} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

Se si indica con $V_s = \sqrt{G/\rho}$ la velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno, la (4) può essere riscritta nella forma:

$$\ddot{u} = V_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

L'equazione (5) esprime la legge di propagazione delle onde di taglio nel terreno e si risolve, nota la $\ddot{u}_b(t)$ al tetto della formazione di base, imponendo la condizione che lo sforzo di taglio τ alla superficie sia nullo. La (5) può essere risolta anche nel caso in cui il terreno sia costituito da un numero finito di strati orizzontali di materiali con diverse caratteristiche geotecniche, imponendo la continuità delle tensioni e delle deformazioni al contatto fra gli strati. L'equazione (5) può essere trasformata, nel caso di mezzo viscoso, introducendo un altro termine che è funzione del fattore di smorzamento D del terreno. La soluzione fornisce l'andamento nel tempo dell'accelerazione, dello sforzo di taglio e dello scorrimento in funzione della profondità dal piano di campagna.

Sulla base di tale modello è stata sviluppata [SCHNABEL e LYSMER, 1972] una procedura di calcolo automatico, che con successive iterazioni permette di risolvere l'equazione della propagazione dell'onda.

Per tener conto del comportamento non lineare del terreno, il modulo G ed il fattore di smorzamento D possono farsi dipendere dal livello di deformazione indotta dalle sollecitazioni sismiche. Nel calcolo, pertanto, fissato un valore iniziale di G e di D si determina un primo valore dello scorrimento γ . In base a tale valore di γ si ricavano i nuovi valori di G e di D e si ripete il calcolo fino a quando lo scarto percentuale fra i valori G , D e γ alla iterazione i ed i rispettivi valori alla iterazione $i - 1$ è ritenuto accettabile.

Per lo sviluppo dei calcoli ci si è avvalsi dell'elaboratore IBM 3033 installato presso il Centro di Calcolo dell'Università di Palermo.

3. Terremoto di progetto

La determinazione del terremoto di progetto è particolarmente complessa per il numero di fattori che influenzano il fenomeno dell'insorgenza delle azioni sismiche e della propagazione di queste nel terreno.

È noto, infatti, che le caratteristiche di un'accelerogramma, $\ddot{u}_s(t)$, che si registra alla superficie del terreno in una particolare stazione per

effetto di un terremoto, dipendono dalle caratteristiche della sorgente sismogenetica, dalla magnitudo del terremoto, dalle proprietà fisico-meccaniche dei terreni attraversati dalle onde sismiche nel percorso dalla sorgente alla stazione di registrazione dell'accelerogramma, dalla lunghezza di tale percorso e dalle caratteristiche geotecniche dei terreni della coltre superficiale su cui si trova la stazione.

Per tale motivo le caratteristiche dell'accelerogramma del terremoto di progetto, da utilizzare nei calcoli, vengono determinate, nella generalità dei casi, seguendo criteri probabilistici.

Sulla base della conoscenza dei lineamenti tettonici e della storia sismica di una regione è possibile individuare le caratteristiche delle sorgenti sismogenetiche e dei terremoti che hanno la probabilità di verificarsi con un prefissato tempo di ritorno. Si ricavano, in tal modo, indicazioni sui valori della magnitudo, della durata, dell'accelerazione e del periodo predominante per i terremoti che possono insorgere nella regione in esame.

I valori dell'accelerazione massima A_{mbs} e del periodo predominante T_{pbs} dell'accelerogramma $\ddot{u}_{bs}(t)$ al tetto della formazione di base, supposta affiorante nel particolare sito del quale si vuole studiare la risposta dinamica locale, possono determinarsi, nota la distanza di tale sito dalla sorgente di rilascio energetico, mediante diverse relazioni [SEED, IDRIS, KIEFER, 1969; TRAFUNAC, BRADY, 1967]. Gli studiosi che hanno ricavato tali relazioni hanno utilizzato numerosi accelerogrammi; alcuni di questi sono registrati sui terreni della formazione di base affiorante, altri sui terreni della coltre superficiale; per rendere i dati omogenei, tuttavia, questi ultimi sono stati « depurati » dagli effetti della risposta dinamica locale. Le relazioni ottenute possono applicarsi, pertanto, solamente quando si disponga di dati di risposta dinamica locale.

Noti l'accelerazione massima A_{mbs} ed il periodo predominante T_{pbs} del terremoto in corrispondenza della formazione di base affiorante, l'accelerogramma di tale terremoto si ottiene scegliendo, tra quelli registrati nel corso di eventi sismici che hanno avuto origine nel passato dalla stessa sorgente sismogenetica, un accelerogramma $\ddot{u}(t)$ che abbia accelerazione massima e periodo predominante prossimi a quelli del terremoto $\ddot{u}_{bs}(t)$; si modifica, quindi, l'accelerogramma scelto $\ddot{u}(t)$ e si ricava un accelerogramma $\ddot{u}_{bs}(t)$, che ha accelerazione massima e periodo predominante uguali, rispettivamente,

ad A_{mbs} e T_{pbs} . Il terremoto di progetto, $\ddot{u}_b(t)$, da utilizzare nei calcoli per la determinazione della risposta dinamica locale, si ricava dalla $\ddot{u}_{bs}(t)$, in funzione delle caratteristiche dei terreni che costituiscono la formazione di base e della profondità di questa dal piano di campagna.

Al momento non sono disponibili registrazioni di accelerazioni, velocità o spostamenti verificatisi durante i terremoti che hanno avuto luogo lungo la Valle del Belice o in altre località della Sicilia Occidentale. Non è possibile, peraltro, utilizzare gli accelerogrammi registrati nel corso di altri terremoti italiani, poiché nella maggior parte dei casi i dati sulle caratteristiche dei terreni delle località in cui sono situate le stazioni di misura non sono sufficienti per valutare l'influenza dei terreni superficiali sulla registrazione e « depurare » l'accelerogramma dagli effetti della risposta dinamica locale. Si osservi, inoltre, che le leggi di variazione del periodo predominante del terremoto in funzione della magnitudo e della distanza dalla sorgente di rilascio energetico, relativamente ai terremoti italiani, non sono ancora note con sufficiente attendibilità.

Le relazioni, riportate sulla letteratura, che legano l'accelerazione al suolo A_{mbs} , ed il periodo predominante T_{pbs} dell'accelerogramma $\ddot{u}_{bs}(t)$ sulla formazione di base affiorante, alla distanza dalla sorgente sismogenetica sono state ricavate da un'analisi degli accelerogrammi registrati nel corso di diversi terremoti, che si sono verificati in località che ricadono nella parte orientale degli Stati Uniti.

Non è facile valutare se ed in quali casi tali relazioni possono essere applicate agli accelerogrammi che si registrano nel corso di terremoti italiani. Per tale motivo, in questa fase dello studio, per determinare l'accelerogramma del terremoto di progetto, $\ddot{u}_b(t)$, da utilizzare nei calcoli, ci si è riferiti ad un accelerogramma registrato nel corso del terremoto di San Fernando del 1971 presso la stazione californiana di Lake Hughes n. 4. Tale stazione è fondata direttamente sui terreni della formazione di base, che è affiorante; quindi, la registrazione non è influenzata dagli effetti della risposta dinamica locale.

L'accelerazione massima A_{mbs} e il periodo predominante T_{pbs} del terremoto $\ddot{u}_{bs}(t)$, sulla formazione di base affiorante, sono stati ricavati, mediante le relazioni già richiamate, per un terremoto di magnitudo $M = 6,5$ ed una distanza dalla sorgente sismogenetica di 60 Km. In

particolare, si è trovato $A_{mbs} = 0,05$ g e $T_{pbs} = 0,3$ sec. Il terremoto di progetto $\ddot{u}_b(t)$, per tutti i profili esaminati, è stato ottenuto, mediante deconvoluzione, dalla $\ddot{u}_{bs}(t)$ [SCHNABEL, SEED e LYSMER, 1971].

4. Profili del terreno

I profili considerati nell'analisi possono ritenersi tipici del sottosuolo della città di Palermo.

La formazione, che ai fini del presente studio può assumere il significato di bedrock, è una formazione oligo-miocenica di grande potenza (Flysch Numidico), localmente denominata « Ginolfo », costituita di *argille*, talvolta, marnose con rare lenti o banchi quarzarenitici. Tale formazione, che in alcune aree è affiorante o subaffiorante, si rinviene a profondità dal piano di campagna molto variabili anche nell'ambito di distanze modeste e presenta, a volte, uno strato superficiale alterato dello spessore di qualche metro.

I terreni della coltre superficiale sono del quaternario e comprendono il complesso delle « sabbie limose » grigio-azzurre ed il complesso delle *calcareniti*.

La definizione di profili tipici si presenta incerta per l'estrema variabilità dello spessore e delle caratteristiche dei terreni della coltre, che comprende rocce sciolte e rocce lapidee molto diverse e variamente disposte.

Per tale motivo, nel presente studio preliminare, si è ritenuto opportuno analizzare il problema con riferimento ad alcuni profili schematici. I risultati ottenuti consentono di trarre indicazioni utili per orientare gli studi sulla zonazione sismica della città.

Allo scopo di valutare l'influenza dello spessore e delle caratteristiche dei terreni superficiali, si sono scelti nove profili di terreni omogenei e sette profili di terreni non omogenei. I profili adottati nei calcoli e le relative sigle di riferimento sono riportati nella fig. 3. La sigla del profilo è formata da un numero (1, 3, 5), che individua la profondità della formazione di base dal piano di campagna, assunta, rispettivamente, pari a 10, 30 e 50 metri e da due lettere che individuano i terreni superficiali, costituiti da un unico strato di calcarenite CC, sabbia SS o argilla AA o da due strati di uguale spessore di sabbia e calcarenite, SC, o sabbia e argilla, SA. In quest'ultimo si considera il caso dello strato di sabbia a contatto con la formazione di base.

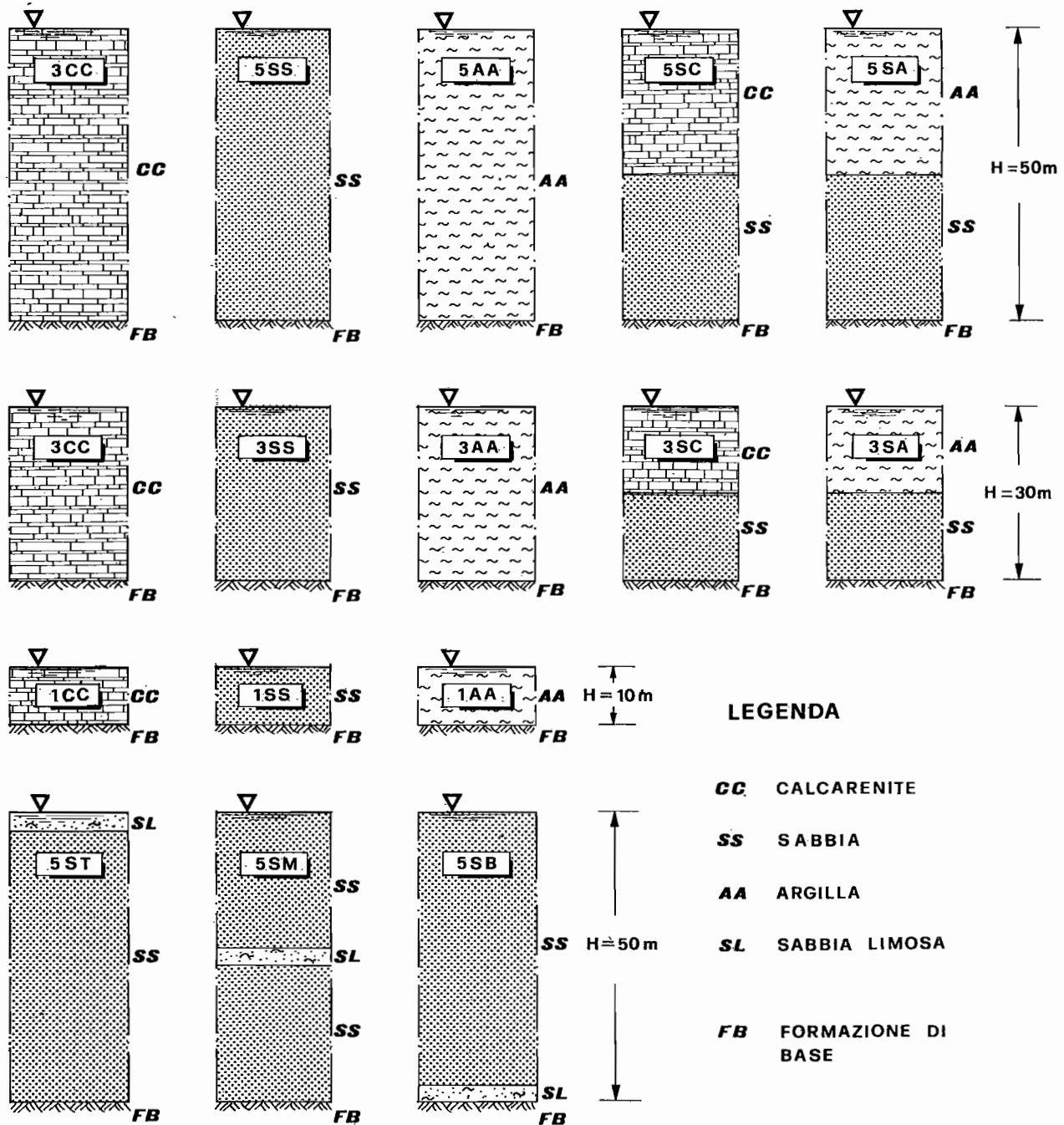


Fig. 3. - Profili schematici tipici del sottosuolo della città di Palermo considerati nell'analisi della risposta dinamica locale.

Infine, allo scopo di valutare gli effetti della presenza di un sottile strato di sabbia limosa all'interno di uno strato di sabbia di 50 metri di spessore, si sono presi in esame i tre profili 5ST, 5SM e 5SB, che differiscono per la posizione dello strato di sabbia limosa posto, rispettivamente, in sommità, al centro ed alla base.

In tutti i casi esaminati si è ammesso, per semplicità, che i terreni siano saturi con falda al piano campagna.

5. Caratteristiche meccaniche

Le proprietà dei terreni sono state valutate sulla base dei dati esposti in un primo recente studio sulla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo di Palermo [JAPPELLI, CUSIMANO, LIGUORI, VALORE, 1981]; questi sono stati integrati da risultati di prove in situ ed in laboratorio eseguite successivamente.

Poiché le caratteristiche dei terreni sono variabili, si è ritenuto opportuno adottare valori caratteristici per i parametri geotecnici. In

particolare, per il peso dell'unità di volume dei terreni superficiali (sabbia, argilla, calcarenite), si è assunto il valore $1,9 \text{ t/m}^3$; per la formazione di base questo parametro è stato posto eguale a $2,2 \text{ t/m}^3$. Si è assunto, inoltre, per la densità relativa D_r della sabbia un valore costante, pari a $0,75$ e per la coesione non drenata c_u dell'argilla un valore crescente con la profondità secondo la relazione $c_u = 3 + 0,3 \sigma'_v$ t/m^2 .

Lo strato di sabbia limosa è stato assimilato, ai fini dei calcoli, ad uno strato di sabbia con densità relativa $D_r = 0,45$.

La velocità di propagazione delle onde di taglio V_s , il modulo di elasticità tangenziale G ed il fattore di smorzamento D , nonché le relazioni che legano G e D allo scorrimento tangenziale γ , sono stati stimati per tutti i terreni sulla base di criteri e di risultati di prove dinamiche di laboratorio eseguite da diversi sperimentatori americani [SEED e IDRIS, 1970; SEED, KOVACKS e CHAN, 1971; HARDIN e DRNEVICH, 1972]. In particolare, Seed e Idriss suggeriscono di valutare il modulo di elasticità tangenziale G delle sabbie con la relazione:

$$G = 22 K_2 (\sigma'_m)^{1/2}$$

dove σ'_m è la tensione effettiva media e K_2 un parametro che dipende dalla densità relativa D_r e dallo scorrimento tangenziale γ ; G e σ'_m sono espressi in Kg/cm^2 . Le relazioni $K_2(\gamma)$ per $D_r = 0,75$ e $D_r = 0,45$ sono riportate in fig. 4.

Il modulo G dell'argilla in funzione dello scorrimento γ , può essere valutato approssimativamente utilizzando la relazione di fig. 5, che esprime un legame fra questa componente della deformazione ed il rapporto adimensionale G/c_u .

I valori del fattore di smorzamento D per la sabbia e per l'argilla, in funzione di γ , si ricavano dalla fig. 6.

Nelle figg. 7 e 8 si riportano, infine, le relazioni proposte da Seed e Idriss per la determinazione del modulo di elasticità tangenziale G e del fattore di smorzamento D , al variare dello scorrimento γ , per le rocce lapidee. I valori di G sono normalizzati rispetto al valore di G relativo ad uno scorrimento tangenziale $\gamma = 10^{-4}\%$. I valori del modulo G relativi ad uno scorrimento $\gamma = 10^{-4}\%$ si determinano per i due tipi di terreni mediante la relazione

$$G_{\gamma=10^{-4}\%} = V_s^2 \rho$$

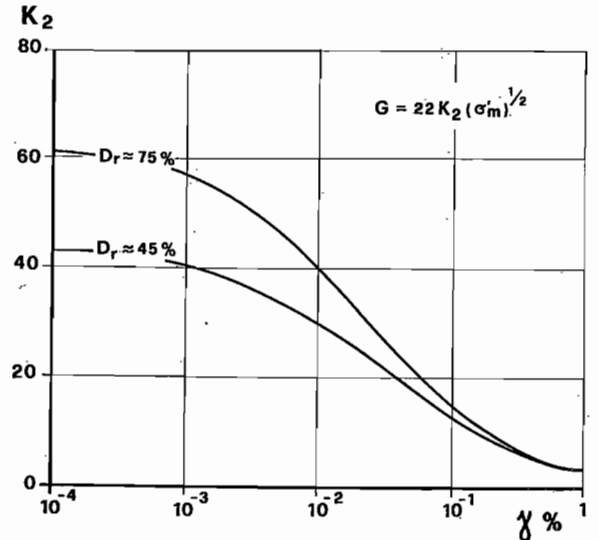


Fig. 4. - Valori di K_2 in funzione dello scorrimento γ .

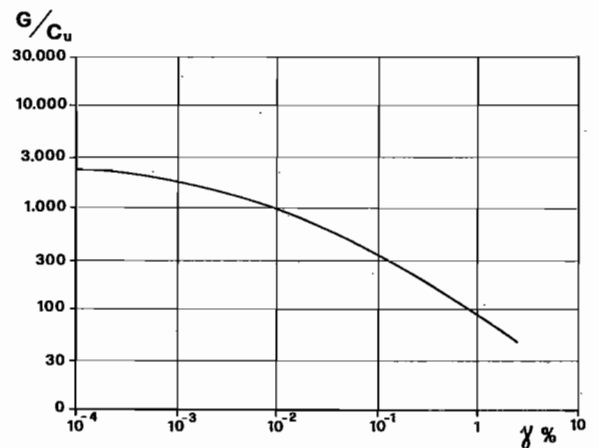


Fig. 5. - Valori del rapporto G/c_u in funzione dello scorrimento γ .

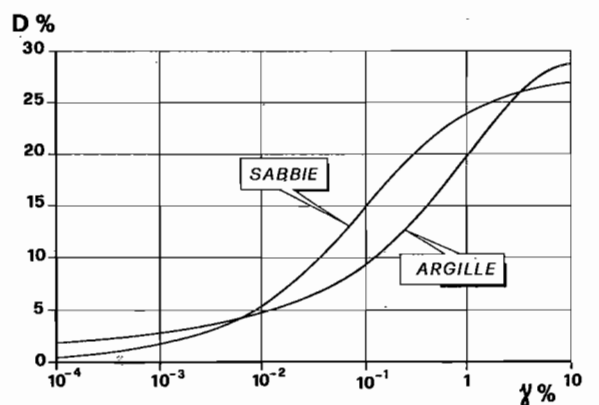


Fig. 6. - Valori del fattore di smorzamento D in funzione dello scorrimento γ per la sabbia e per l'argilla.

in cui V_s è la velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno.

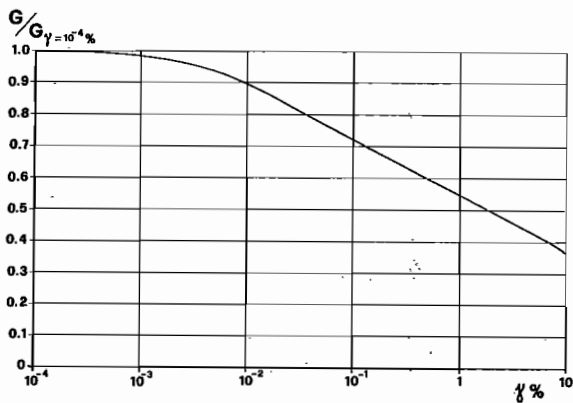


Fig. 7. - Valori di $G/G_{\gamma=10^{-4}\%}$ in funzione dello scorrimento γ per rocce lapidee.

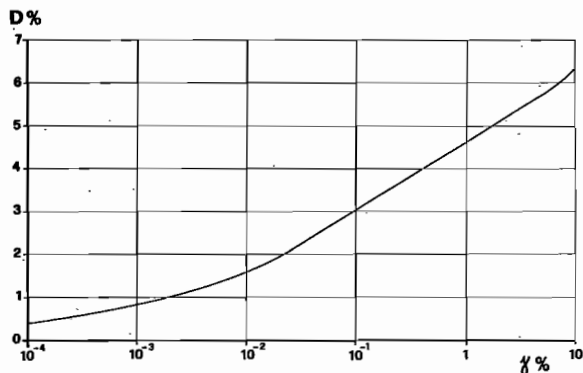


Fig. 8. - Valori del fattore di smorzamento D in funzione dello scorrimento tangenziale γ per rocce lapidee.

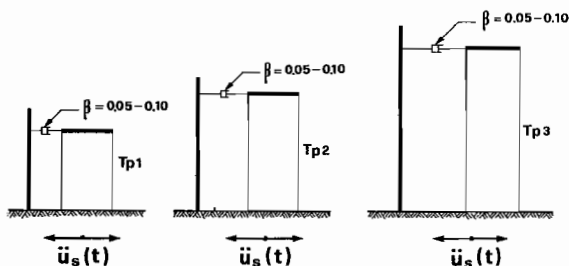


Fig. 9. - Schema fisico di riferimento per la determinazione dello spettro di risposta.

Per la calcarenite si è assunto $V_s=750$ m/sec; per i terreni della formazione di base la V_s è stata valutata intorno a 1200 m/sec.

Per la calcarenite i valori del fattore di smorzamento D , che si ricavano dalla curva di fig. 8, sono stati incrementati del 10%.

6. Piano dei calcoli

Per ciascun profilo dei terreni si sono calcolati l'andamento nel tempo dell'accelerazione, dello sforzo di taglio e dello scorrimento tan-

genziale, in funzione della profondità dal piano di campagna e si è determinato il valore del rapporto A_{ms}/A_{mb} fra l'accelerazione massima in superficie e l'accelerazione massima al tetto della formazione di base.

Si sono calcolati, inoltre, gli spettri di risposta delle accelerazioni relativi all'accelerogramma superficiale $\ddot{u}_s(t)$ per due valori dello smorzamento β della struttura. Tali spettri forniscono per ogni valore del periodo predominante T_p l'accelerazione massima di un oscillatore ad un solo grado di libertà con periodo predominante pari a T_p e smorzamento β .

Dall'esame dello spettro di risposta si possono trarre alcune indicazioni di carattere generale sul comportamento di una struttura, in presenza di sollecitazioni sismiche, in relazione alle caratteristiche dei terreni del sottosuolo.

Lo schema fisico per il calcolo degli spettri di risposta è riportato nella fig. 9. I valori che sono stati assegnati a β sono quelli che si adottano nella generalità dei casi per le strutture in acciaio ed in calcestruzzo e valgono, rispettivamente, 0,05 e 0,10.

7. Risultati

Nella fig. 10 è riportato lo spettro di risposta dell'accelerogramma superficiale $\ddot{u}_{bs}(t)$, al tetto della formazione affiorante, calcolato per il valore $\beta = 0$.

Nelle figg. 11 e 12 sono riportati gli spettri di risposta dell'accelerogramma che si ricava alla superficie per i profili dei terreni omogenei e nelle figg. 13 e 14 gli spettri di risposta ottenuti per il caso dei terreni non omogenei. Per rendere più agevole il confronto fra le diverse curve, i valori dell'accelerazione spettrale S_a sono stati normalizzati rispetto al valore massimo dell'accelerazione superficiale A_{ms} . Tali spettri forniscono, pertanto, per ogni valore del periodo predominante T_p , il valore del rapporto $S_{an} = S_a/A_{ms}$.

Per tutti gli spettri di risposta si sono determinati il valore del periodo T^*_p , in secondi, cui corrisponde la massima accelerazione spettrale S^*_{an} , nonché i valori di S^*_{an} per $\beta = 0,05$ e $\beta = 0,10$. Si sono calcolati, infine, l'accelerazione massima in superficie A_{ms}/g ed il valore del rapporto A_{ms}/A_{mb} fra l'accelerazione massima in superficie A_{ms} e l'accelerazione massima al tetto della formazione di base A_{mb} .

I risultati ottenuti sono raccolti in sintesi nella tab. I.

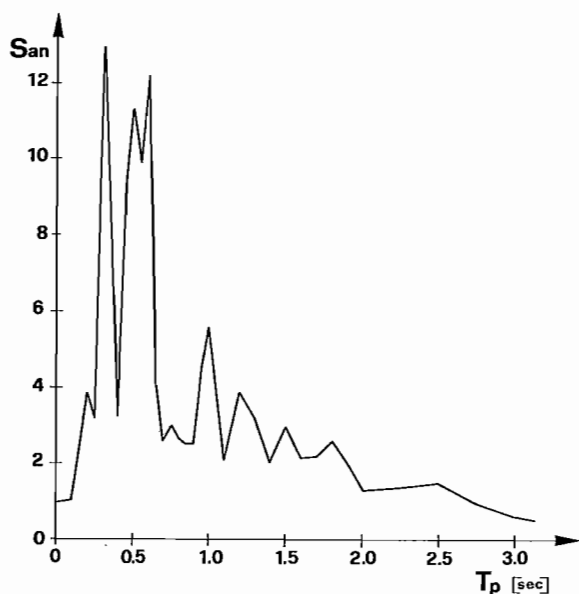


Fig. 10. - Spettro di risposta dell'accelerogramma $\ddot{u}_{ba}(t)$ al tetto della formazione di base affiorante.

8. Confronti

I profili considerati nei calcoli differiscono per lo spessore e per le caratteristiche dei terreni superficiali. I risultati dei calcoli permettono, pertanto, di valutare per un particolare tipo di terreno l'influenza dello spessore dello strato e analogamente, fissato lo spessore H dei terreni superficiali l'influenza delle caratteristiche del terreno sulla risposta dinamica locale.

Per confrontare i risultati si raggruppano i profili in due classi: terreni omogenei e terreni non omogenei.

In entrambi i casi, fissate le caratteristiche dello strato di terreno superficiale, si valutano gli effetti dello spessore H ; inoltre, fissato H , si confrontano i risultati al variare delle caratteristiche del terreno.

Per i profili della seconda classe si distinguono, inoltre, due casi. Nel primo i terreni superficiali sono costituiti da due strati di pari spessore di materiali diversi. Nel secondo caso un sottile strato di sabbia limosa è posto a quote diverse all'interno dello strato superficiale di sabbia.

Infine, fissato lo spessore complessivo H dei terreni di copertura si confrontano i risultati ottenuti per i profili delle due classi.

Dai profili omogenei, risulta che nel caso in cui il terreno superficiale sia costituito di calcarenite (1CC, 3CC, 5CC), il valore del periodo T_p^* cui corrisponde la massima accelerazione spettrale è uguale a 0,6 sec per i profili 1CC e 3CC ed è uguale a 0,3 sec per il profilo 5CC; il

valore massimo del rapporto fra l'accelerazione spettrale massima e l'accelerazione massima in superficie S_{an}^* è pari a circa 3 per i profili 1CC e 3CC e pari a circa 4 per il profilo 5CC.

Nel caso in cui il terreno superficiale sia costituito di sabbia (1SS, 3SS, 5SS), si osserva, invece, che all'aumentare dello spessore dello strato il valore di T_p^* cresce da un minimo di 0,6 sec al valore di 0,9 sec mentre S_{an}^* decresce da un massimo di 4,5 circa al valore di 3,2; gli spettri di risposta relativi al profilo 5SS presentano, inoltre, tre picchi in corrispondenza dei valori T_p^* di 0,3, 0,6 e 0,9 sec.

Nel caso in cui il terreno superficiale sia costituito di argilla (1AA, 3AA, 5AA), per l'intero spessore, il valore di T_p^* cresce da un minimo di 0,3 al valore di 1,0 sec mentre S_{an}^* decresce da un massimo di 4,4 al valore di 3,6; gli spettri di risposta relativi al profilo 5AA presentano due picchi in corrispondenza dei valori di T_p^* di 0,35 sec e 1,0 sec.

Quanto all'interazione del fattore terreno con il fattore spessore, si osserva che, fissato lo spessore H , gli spettri di risposta, che si ottengono nei due casi di terreno superficiale costituito di sabbia o di argilla e di spessore pari a 10 e 30 m (1SS, 1AA, 3SS e 3AA), sono molto simili; per $H = 50$ m, invece (5SS, 5AA), gli spettri di risposta dei due profili sono alquanto diversi.

Nel caso di terreni non omogenei costituiti da uno strato di sabbia sottostante ad uno strato di calcarenite (3SC, 5SC), il valore di T_p^* è sempre pari a 0,6 sec, mentre S_{an} vale nei due casi, rispettivamente, 4,2 e 3,1. Se lo strato superiore è costituito di argilla (3SA, 5SA), i valori di T_p^* che si ricavano dagli spettri di risposta relativi ai due profili valgono rispettivamente 0,6 e 1,0 ed i valori corrispondenti di S_{an}^* sono 4,5 e 3,5.

Si osserva, inoltre, che gli spettri di risposta relativi ai profili 3SC e 3SA sono tra loro simili, mentre quelli relativi ai profili 5SC e 5SA hanno caratteristiche diverse.

Sono evidenti gli effetti delle caratteristiche dei terreni superficiali sulla risposta dinamica locale. Nel caso del profilo 5SA per la presenza dello strato di argilla si riducono, infatti, i contenuti energetici alle alte frequenze della registrazione di superficie e, di conseguenza, il valore di T_p^* cresce.

Gli spettri di risposta relativi ai profili 5ST, 5SM e 5SB, che si riferiscono al caso in cui all'interno dello strato di sabbia sia presente uno strato di sabbia limosa dello spessore di 3 m, sono, infine, molto simili fra loro; la quota alla

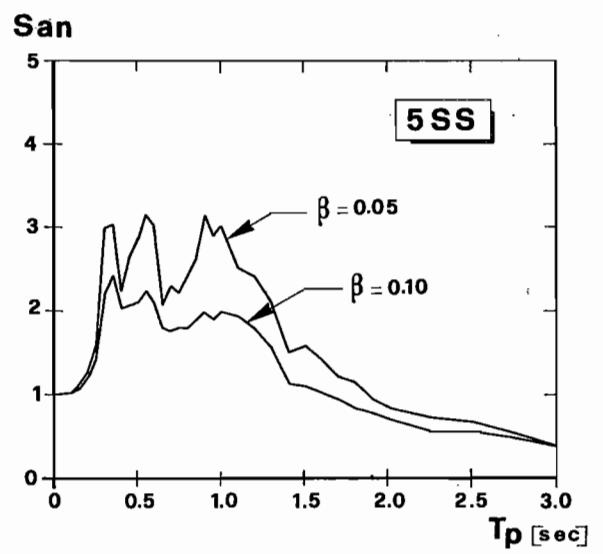
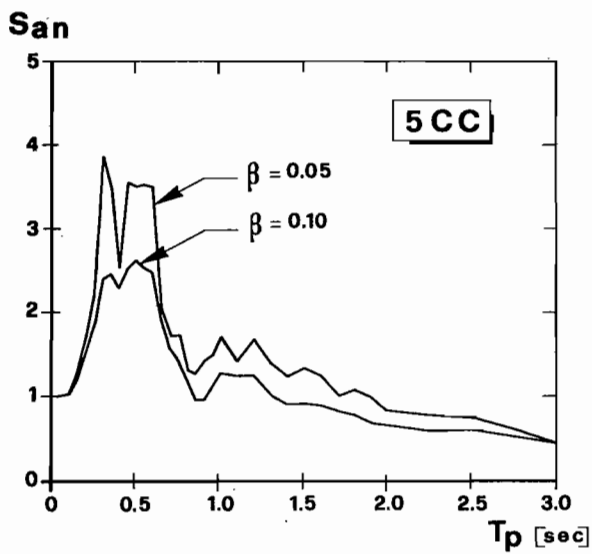
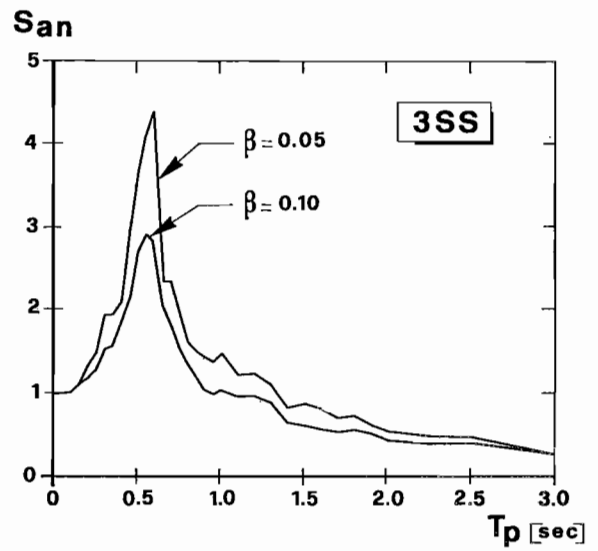
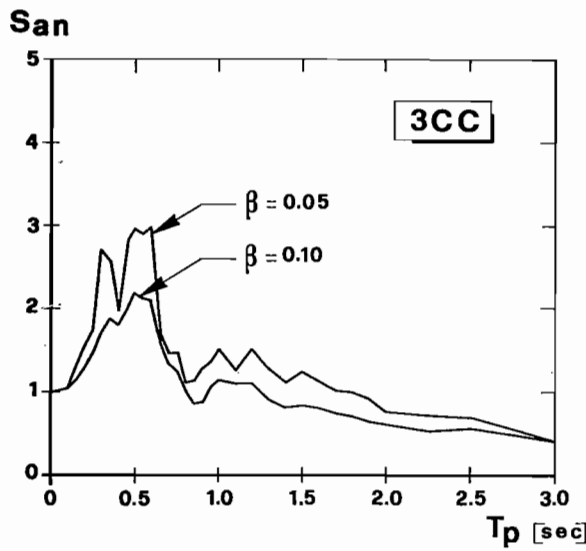
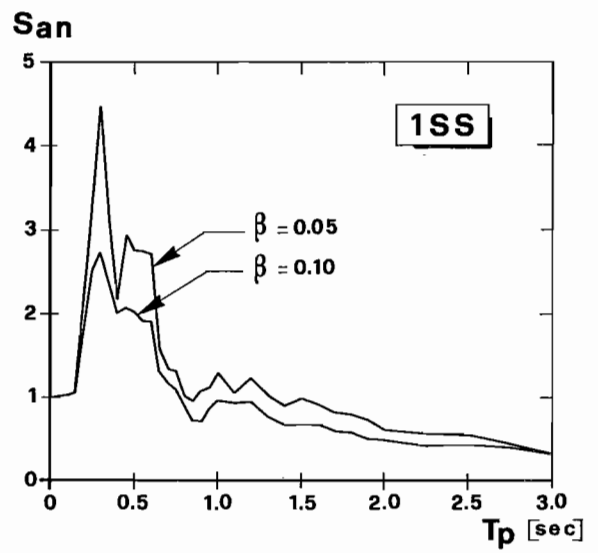
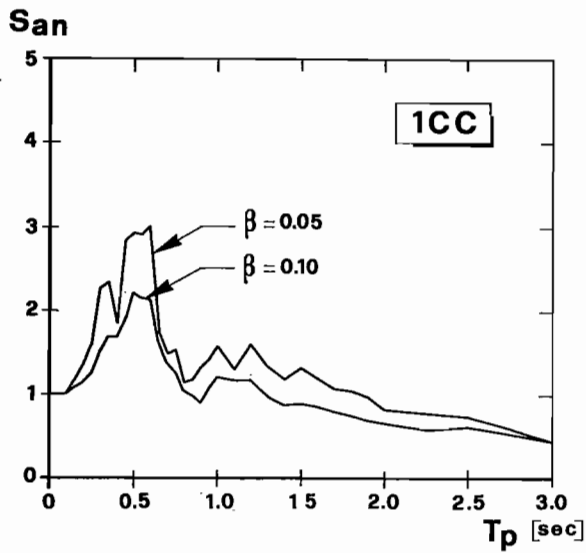


Fig. 11 - Spettri di risposta dell'accelerogramma superficiale per i profili di terreni omogenei.

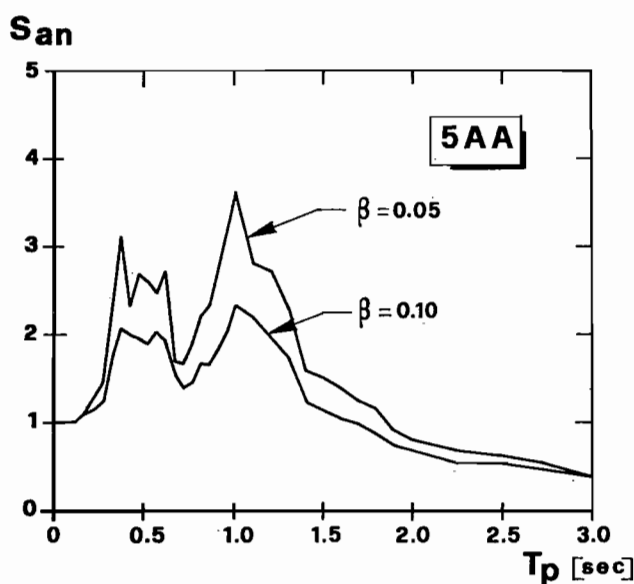
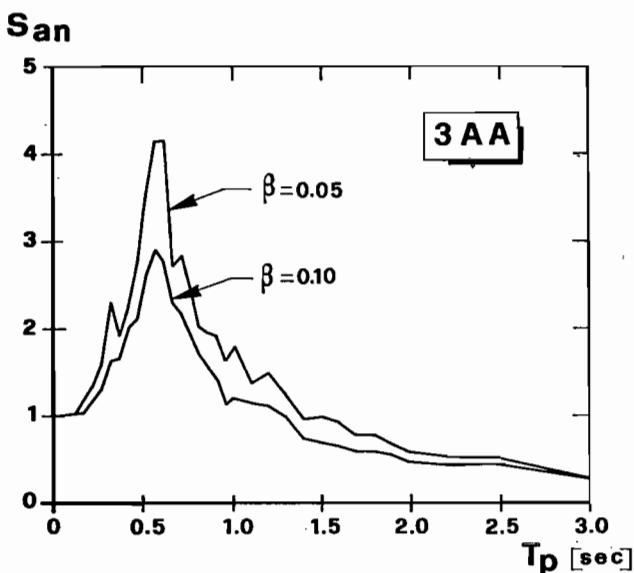
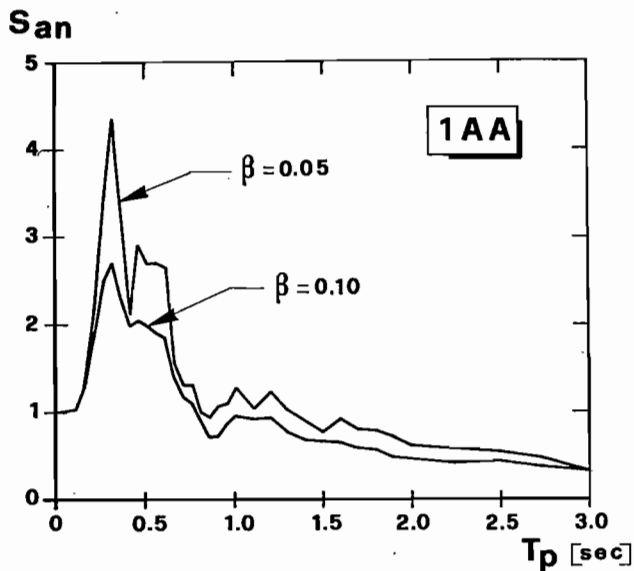


Fig. 12. - Spettri di risposta dell'accelerogramma superficiale per i profili di terreni omogenei.

quale si trova lo strato di sabbia non sembra, pertanto, ai fini pratici, influenzare il risultato. Tali spettri, peraltro, non differiscono sensibilmente da quello relativo al profilo 5SS, in cui lo strato di sabbia limosa è assente.

Particolarmente interessante risulta il confronto fra i valori delle accelerazioni massime in superficie ed al tetto della formazione di base per i diversi profili del terreno.

L'accelerazione massima in superficie A_{ms} è sempre maggiore dell'accelerazione massima al tetto della formazione di base A_{mb} per effetto del fenomeno di amplificazione dovuto alla presenza di terreni superficiali. Il rapporto A_{ms}/A_{mb} è massimo nei casi in cui lo spessore dello strato dei terreni superficiali è di 30 m; fissato questo valore, il rapporto è massimo nel caso in cui i terreni superficiali sono costituiti di argilla (AA) o di sabbia e argilla (SA). Per i profili del tipo CC o del tipo SC, terreni superficiali costituiti di uno strato di calcarenite o di uno strato di sabbia ed uno di calcarenite, il rapporto A_{ms}/A_{mb} supera di poco l'unità.

Per i profili 5ST, 5SM e 5SB, relativi al caso in cui all'interno dello strato di sabbia è presente uno strato di sabbia limosa, il valore del rapporto A_{ms}/A_{mb} è compreso fra 1,3 ed 1,5 e risulta sempre minore del valore che si ottiene per il profilo 5SS.

9. Conclusioni

Un noto modello di calcolo è stato applicato allo studio della risposta dinamica locale del sottosuolo di Palermo.

Per valutare l'influenza delle caratteristiche e dello spessore dei terreni superficiali i calcoli sono stati sviluppati con riferimento ad alcune situazioni geotecniche tipiche.

L'influenza dei terreni superficiali può dedursi dal confronto fra le caratteristiche dell'accelerogramma $\ddot{u}_s(t)$ alla superficie del terreno e l'accelerogramma $\ddot{u}_b(t)$ che rappresenta l'azione sismica applicata al tetto della formazione di base.

Si è osservato che, nel caso in cui tale formazione è ricoperta da uno strato di materiale omogeneo poco deformabile (calcarenite), l'accelerogramma che si registra alla superficie non differisce apprezzabilmente da quello al tetto della formazione di base.

In tal caso, inoltre, la risposta dinamica non è influenzata in modo sensibile dallo spessore dei terreni superficiali.

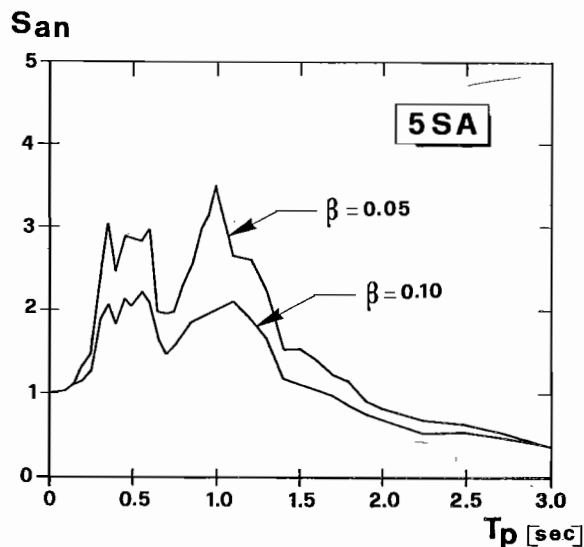
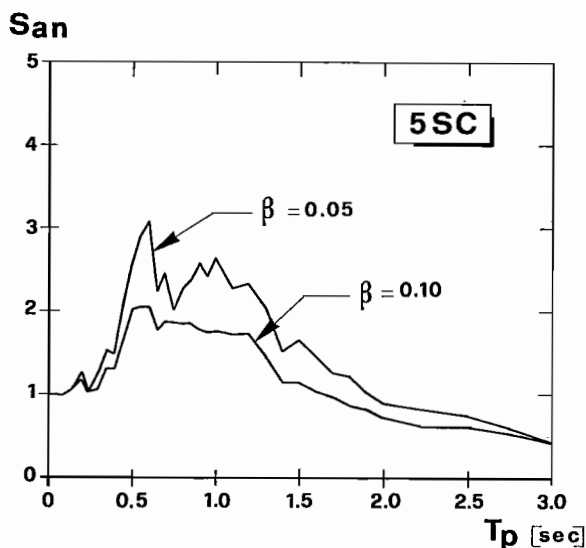
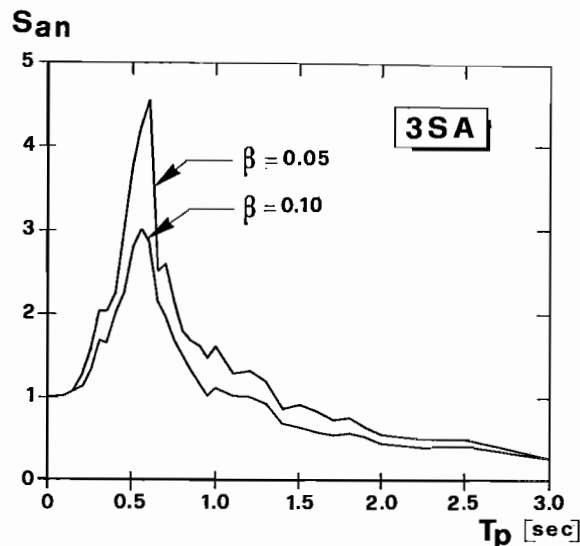
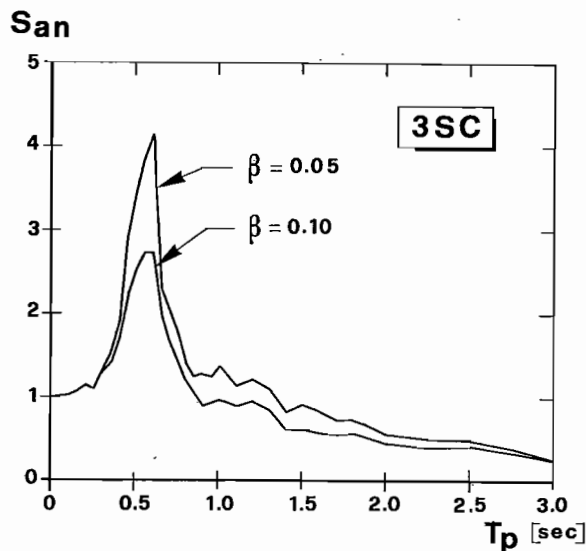


Fig. 13. - Spettri di risposta dell'accelerogramma superficiale per i profili di terreni non omogenei.

Le caratteristiche delle onde sismiche che si propagano dal tetto della formazione di base alla superficie del terreno, vengono, invece, modificate in misura via via più accentuata all'aumentare della deformabilità dei terreni superficiali.

Con riferimento ai profili tipici posti a base dei calcoli, si osserva che passando dal caso dei terreni superficiali costituiti di rocce lapidee poco deformabili (calcareniti) al caso di sabbie e calcareniti ed infine ad associazioni di sabbia e argilla, i contenuti energetici dell'accelerogramma $\ddot{u}_s(t)$ rispetto a quelli dell'accelerogramma $\ddot{u}_b(t)$ al bedrock, sono più bassi alle alte frequenze e maggiori alle basse frequenze. Le differenze sono tanto maggiori quan-

to più deformabili sono i terreni superficiali, come si osserva dagli spettri di risposta relativi ai profili di terreni costituiti nell'ordine da: uno strato di sabbia sottostante ad uno di calcarenite (SC), uno strato omogeneo di sabbia (SS), uno strato di sabbia con intercalato un sottile livello di sabbia limosa (ST, SM, SB), uno strato di sabbia sottostante ad uno di argilla (SA) e da uno strato omogeneo di argilla (AA).

Si osserva, inoltre, che il valore del periodo T_p^* , cui corrisponde la massima accelerazione spettrale, cresce quando la rigidità dei terreni superficiali diminuisce. Nel caso in cui questi ultimi sono costituiti di rocce sciolte, T_p^* aumenta anche all'aumentare dello spessore.

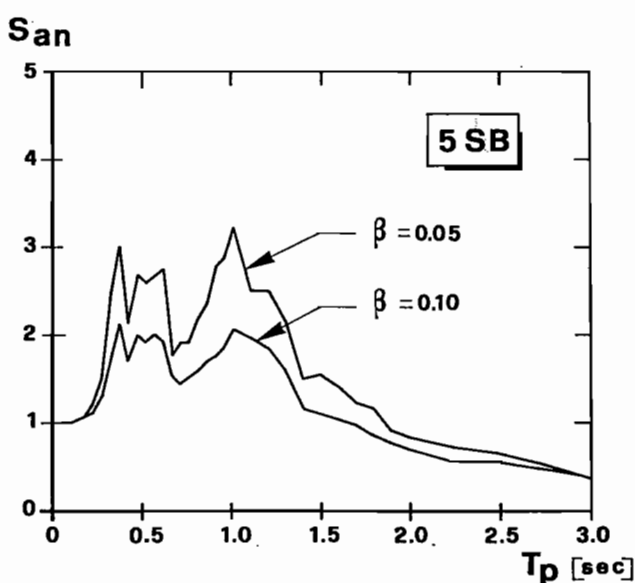
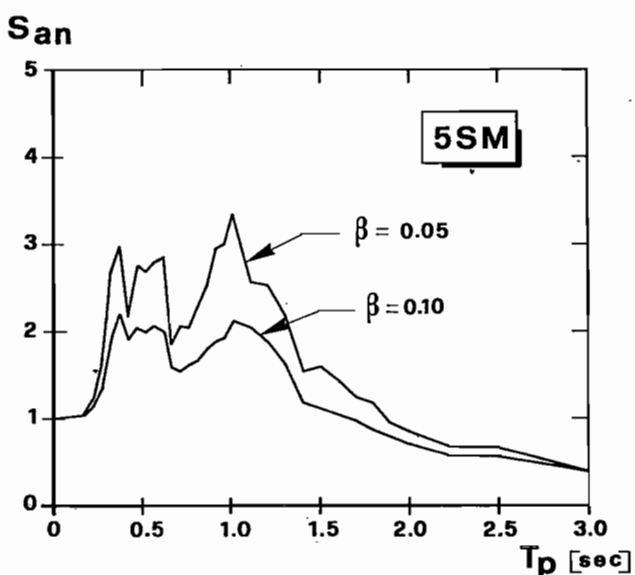
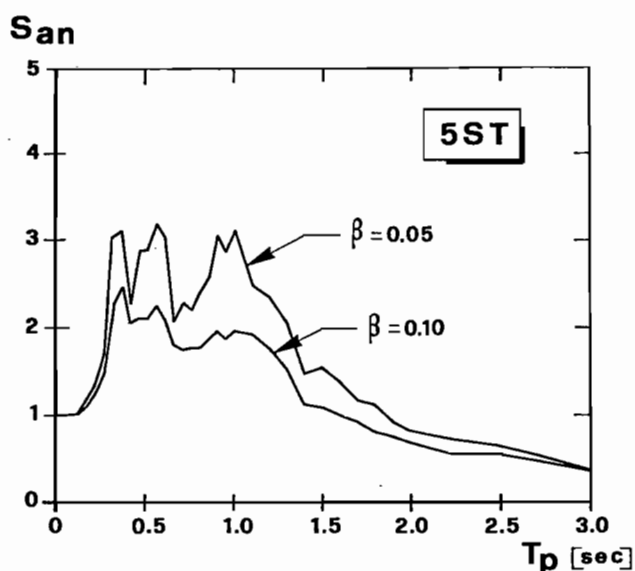


Fig. 14. - Spettri di risposta dell'accelerogramma superficiale per i profili di terreni non omogenei.

I risultati che si ottengono nel caso in cui la formazione di base è ricoperta da uno strato di sabbia con incluso un sottile strato di sabbia limosa, disposto a quote diverse, mostrano, infine, che la posizione di tale strato non influenza in misura apprezzabile la risposta dinamica.

Si può concludere che nel caso in cui i terreni superficiali siano costituiti di rocce sciolte, le caratteristiche dell'azione sismica che si registra in superficie sono influenzate sia dalle proprietà di tali terreni che dal loro spessore, mentre nel caso in cui i terreni superficiali siano costituiti di rocce lapidee l'influenza dello spessore è trascurabile.

La conoscenza dello spettro di risposta permette di valutare nelle linee generali il comportamento dinamico di una struttura. Per i profili esaminati si riconosce, ad esempio, che un edificio di 30 ÷ 50 metri di altezza localizzato ove i terreni del sottosuolo possono schematizzarsi con uno dei profili 1CC, 3CC, 1AA, 3AA, 1SS, 3SS ovvero con uno dei profili 5AA, 5SS, 5SA, 5SC, 5ST, 5SM, 5SB sarebbe soggetto, nei due casi, a sollecitazioni molto diverse per effetto della medesima azione sismica.

È opportuno precisare, tuttavia, che i risultati sono notevolmente influenzati dalla scelta del terremoto di progetto e dalle relazioni $G(\gamma)$ e $D(\gamma)$ adottate per i terreni; le indicazioni che se ne traggono, pertanto, sono solo di carattere generale.

Si deve tener presente, infine, che gli spettri di risposta sono stati ricavati applicando ad un oscillatore ad un solo grado di libertà l'accelerogramma $\ddot{u}_s(t)$ e ricavando l'accelerazione massima dell'oscillatore. In tal modo, si estrapola il comportamento di un oscillatore elementare a quello di una struttura a più gradi di libertà; gli spettri di risposta così ottenuti sono, pertanto, solo indicativi del comportamento di una struttura a più gradi di libertà.

Pur riconoscendo la necessità di uno studio che prenda le mosse, innanzitutto, da una più avanzata caratterizzazione geotecnica e da una analisi dei terremoti che si sono verificati nella zona, si ritiene che, nei limiti delle ipotesi adottate, i risultati ottenuti possano utilmente orientare la ricerca sperimentale sull'influenza dei principali parametri geotecnici sulla risposta dinamica locale di alcuni tipi di terreni che si rinvengono nel sottosuolo della città.

Tab. I - Valori di T_p^* , S_{an}^* , A_{ms}/g e del rapporto A_{ms}/A_{mb}

PROFILI RISULTATI	H = 10 m			H = 30 m					H = 50 m							
	CC	SS	AA	CC	SS	AA	SC	SA	CC	SS	AA	SC	SA	ST	SM	SB
T_p^* (sec)	0,6	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,9	1,0	0,6	1,0	0,5	1,0	1,0
S_{an}^* $\beta = 0,05$	3,0	4,5	4,4	3,0	4,4	4,2	4,2	4,5	4,0	3,2	3,6	3,1	3,5	3,2	3,4	3,2
S_{an}^* $\beta = 0,10$	2,1	2,7	2,7	2,3	2,8	2,8	2,7	2,9	2,4	2,0	2,3	2,0	2,2	2,0	2,1	2,1
A_{ms}/A_{mb}	1,0	1,3	1,4	1,0	1,9	1,8	1,7	2,9	1,0	1,4	1,7	1,2	1,6	1,5	1,5	1,5
A_{ms}/g	0,05	0,06	0,06	0,05	0,09	0,08	0,08	0,09	0,05	0,07	0,08	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07

BIBLIOGRAFIA

- HARDIN B. O., DRNEVICH V. P. (1972) - *Shear Modulus and Damping in Soil: Design Equations and Curves*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, n. SM7, pp. 667-692.
- JAPPELLI R., CUSIMANO G., LIGUORI V., VALORE C. (1981) - *Contributo alla conoscenza geotecnica del sottosuolo di Palermo*. Gruppo Nazionale di Coordinamento per gli Studi di Ingegneria Geotecnica. Atti della Riunione del Gruppo, pp. 271-289.
- KOWACS W. D., SEED H. B. and CHAN C. K. (1971) - *Dynamic Moduli and Damping Ratios for a Soft Clay*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, n. SM1, pp. 59-75.
- SCHNABEL P. B., LYSMER J. (1972) - *SHAKE - A computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*. Report n. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SCHNABEL P. B., SEED H. B., LYSMER J. (1971) - *Modification of Seismograph Records for the Effect of Local Soil Conditions*. Report n. EERC 71-8, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SEED H. B., IDRIS I. M. (1970) - *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*. Report n. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- SEED H. B., IDRIS I. M., KIEFER F. W. (1969) - *Characteristics of Rock Motions During Earthquakes*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, n. SM5, pp. 1199-1218.
- TRIFUNAC M. D., BRADY A. G. (1976) - *Correlations of Peak Acceleration, Velocity and Displacement with Earthquake Magnitude, Distance and Site Conditions*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, pp. 455-471.

SUMMARY

Ground response analysis of some profiles of the subsoil of Palermo.

The response characteristics of sixteen soil deposits which are typical of the subsurface soil conditions of the town of Palermo have been studied.

The analysis is based on the assumption that ground-surface motions are due to the upward propagation of shear

waves through horizontal layers of soil from an underlying rock formation and that all boundaries are horizontal.

An equivalent linear model for determining the shear moduli and damping factors have been adopted and it is assumed that the soil within each layer behaves as a homogeneous viscous material.

The analysis has been performed with reference to a 6,5 magnitude earthquake with the assumption that the town is located about 60 km from the source of energy release.

The examined soil deposits consist of one single layer of calcarenite sand or clay, or of two layers of sand and calcarenite or sand and clay.

For any of the examined soil profiles the time histories of the acceleration, shear stress and shear strain at various depth within the deposit as well as the acceleration response spectra of ground motions have been calculated.

Soil properties assumed in the analysis are as follows: the underlying rock and the calcarenite have shear wave velocities of 1200 and 750 m/sec respectively, the relative density of the sand is equal to 0,75 and the undrained shear strength of the clay is equal to 29 KN/m² at ground surface and increases linearly with depth. Base rock lies at 10, 30 and 50 m below ground level.

The obtained results show that if the soil is relatively stiff (calcarenite) the accelerations at ground surface are similar to those at base rock. It was further noticed that in this case ground response is for all practical purposes independent of the depth to bedrock.

The differences between base rock and ground surface motion become more evident for the case of deposits of soft and deformable soils. In this case the energy content of the ground motion at high and low frequencies is respectively lower and higher than that of the base motion. The differences between base and ground motion increase also with increasing depth to bedrock.

It was also found that the predominant period of the acceleration response spectra calculated for the calcarenite profiles varies between 0,3 and 0,6 sec and may be assumed constant for all practical purposes.

The acceleration response spectra of deposits of sand and calcarenite, sand and clay and clay show increasingly higher values of predominant period which in the case of a 50 m deep clay deposit reaches the maximum value of 1,0 sec.

Though it is believed that further data on the dynamic properties of the soils as well as on the characteristics of the earthquakes which are likely to occur in the area surrounding Palermo are required for a more detailed ground response analysis, it is believed that the obtained results can usefully direct further studies on the influence of the dynamic properties of some soils of the sub-surface of Palermo, on ground response analysis.