RENATO CAPPELLANI

Ipotesi di riclassificazione sismica del territorio della Sicilia Sud-Orientale alla luce del terremoto del 13 dicembre 1990 e di quello dell'11 gennaio 1693

Estratto da « TECNICA E RICOSTRUZIONE » N. 2/1995
Organo ufficiale dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Catania

Tip. « Grafica del Libro » s.n.c. - Catania 1995

Ipotesi di riclassificazione sismica del territorio della Sicilia Sud-Orientale alla luce del terremoto del 13 dicembre 1990 e di quello dell'11 gennaio 1693

RENATO CAPPELLANI (*)

Il terremoto del 13 dicembre 1990 che ha investito la Sicilia sud-orientale, ha consentito di trarre interessanti considerazioni qualitative e quantitative grazie alla notevole mole di registrazioni effettuate dalle apparecchiature dell ENEL.

Per riferimenti più dettagliati si rimanda all'apposita pubblicazione N. 537 dell'Istituto Nazionale di Geofisica a cura di E. Boschi ed Altri, in cui si sono approfonditi in modo completo tutti gli aspetti geosismici del terremoto.

All'ingegnere strutturista invece interessa affrontare il problema sotto un'ottica totalmente diversa da quella del Geofisico, dovendo egli valutare alla fine solo le forze d'inerzia da applicare alla struttura, e non grandezze come magnitudo, intensità, distanze ipocentrali, ecc.

Per tale ragione, in questa nota lo scrivente vuole analizzare il terremoto del 13 dicembre 1990 in termini « ingegneristici » unicamente attraverso lo studio matematico di una registrazione digitale di un accelerogramma relativo a Sortino, giudicato il più significativo, per arrivare ad identificarne lo spettro di risposta elastica e poterne effettuare quindi il confronto con il terremoto dell'11 gennaio 1693 e con quello di progetto dettato dal Regolamento Italiano ed in definitiva ipotizzare un nuovo terremoto di progetto.

Senza alcun altro pregiudizio, sarà pertanto fornito ogni possibile elemento analitico che consenta al Lettore attento di trarre obiettivamente le dovute conclusioni sulla ipotesi di una riclassificazione sismica del nostro territorio.

Premesse

Il terremoto che l'11 gennaio 1693 ha devastato la Sicilia Sud-orientale è stato catalogato tra i più forti che possano aver investito negli ultimi mille anni l'intero territorio italiano.

Il suo periodo di ritorno è stato stimato in circa 322 anni, pertanto esso è atteso nell'arco dei prossimi 20 anni e di contro la vita media delle attuali costruzioni civili è valutabile in circa 80÷100 anni.

Non è pertanto *sconsiderato* riferire lo studio di un nuovo terremoto di progetto a quello del gennaio 1693, i cui parametri sismici sono così stimati:

— Magnitudo:	$M = 7{,}1 \div 7{,}8$
— Intensità:	I = XI grado
— Profondità ipocentrale:	R_i = 14 km (35 km?)
— Accelerazione di picco al bedrock:	a_m = 0,40g - 0,45g

I parametri relativi al sisma del 13 dicembre 1990 possono rilevarsi dalla Pubblicazione N. 537 dell'Istituto Nazionale di Geofisica a cura di E. Boschi:

— Magnitudo:	$M_L = 5{,}4$
— Intensità:	I = V - VII grado
— Profondità ipocentrale:	R_i = 14 - 18 km
— Accelerazione di picco al bedrock:	$a_m = 0{,}10g$
— Momento sismico:	$M_o = 2{,}1 \times 10^{22}$ dyne/cm
— Fattore di attenuazione anelastica:	$k = 0{,}04$
— Corner frequency:	$f_c = 2{,}4$ Hz
— Stress drop:	= 75 bar
— Radiation pattern:	$RMS = 0{,}63$

(*) Ingegnere L.P. iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Catania.

In particolare va sottolineato l'alto valore registrato per il fattore di attenuazione, che per Catania vale $k = 4{,}2\%$ e per Licata supera il 13%.

Tra le svariate registrazioni disponibili, ci si è qui riferiti a quelle relative a Sortino, località che sorge su affioramenti rocciosi (piroclastiti del Miocene Superiore sovrapposte su calcari del Miocene Medio), che meglio trasmetterebbero il segnale del bedrock in superficie e la cui distanza epicentrale è stata di appena 30 km.

La geologia locale di altri siti ha senz'altro prodotto, come a Catania, in cui si è raggiunto un valore di a_p pari a 240 gal, fenomeni di amplificazione superficiale o di distorsione delle onde *S*.

Per la definizione di un terremoto di progetto, oltre che l'accelerazione di picco a_p, occorre fissarne la distribuzione spettrale in frequenza al bedrock ideale e calcolarne la risposta elastica in termini di pseudoaccelerazione efficace.

Restano poi da determinare localmente le funzioni di trasferimento, che in termini di pseudoaccelerazioni, trasferiscono il segnale sismico prodotto dalle onde *S* dal bedrock sino in superficie: tali funzioni dipenderanno in modo *fortemente non lineare* fondamentalmente dalla distribuzione stratigrafica dei seguenti parametri geomeccanici: densità δ, modulo elastico tangenziale *G*, coefficiente di smorzamento ζ, atteso il regime di grandi deformazioni del terreno, corrispondente ad accelerazioni di picco a_p dell'ordine di 0,45 g.

Si ricorda che lo scorrimento al taglio γ compatibile (congruente) con i massimi spostamenti *Sd* del terreno in superficie prodotti da un'assegnata accelerazione di picco a_p, risulta funzione non lineare dello smorzamento ζ del terreno.

È essenziale sottolineare che tali grandezze variano rispetto alle accelerazioni impresse, alla durata del fenomeno e al numero di cicli.

In particolare è importante fissare il legame tra l'abbattimento del modulo di taglio *G* e lo scorrimento γ e viceversa tra l'incremento dello smorzamento ζ e lo scorrimento γ attraverso opportune prove dinamiche di laboratorio di tipo ciclico, dosando opportunamente l'accelerazione strumentale, la durata della prova e numero di cicli. Tali prove di laboratorio sono effettuabili senza problemi presso l'ISMES di Bergamo.

Costruzione degli spettri di risposta, in termini di pseudoaccelerazioni, del sisma del 13-12-1990

Ci si è posti il quesito di identificare il contenuto in frequenza dello spettro di risposta elastica al sisma del 13 dicembre 1990 e confrontarlo con quello del Regolamento Italiano.

Analizzando la componente WE del segnale accelerogrammetrico registrato in Sortino (Fig. 1), tramite appositi algoritmi di calcolo progettati dello scrivente, si è provveduto ad effettuarne la trasformazione di Fourier (Fig. 2)

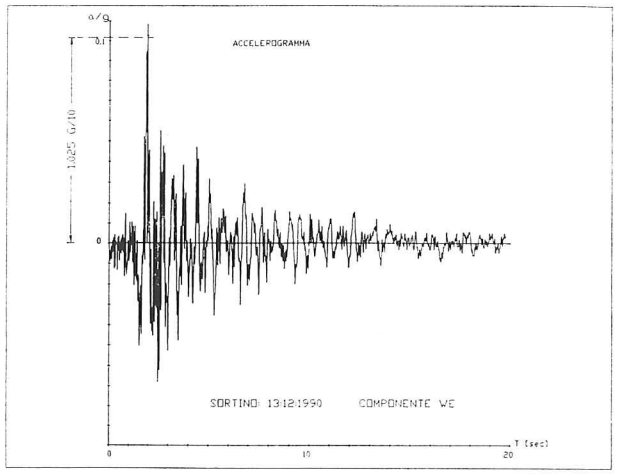


Fig. 1

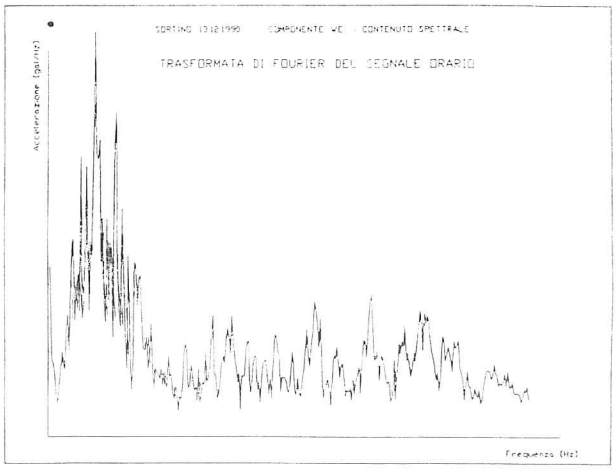


Fig. 2

e successivamente la computazione analitica dell'intensità spettrale *SI* (Fig. 3) e degli spettri di risposta elastica, in termini di pseudo-velocità $Sv(T)$, per i vari valori del coefficiente di smorzamento strutturale ν riferito al valor critico (Fig. 4), attraverso la tecnica d'integrazione per convoluzione (Fig. 4bis), e trattandosi di valori di ν molto piccoli, si è risaliti per quadratura alle pseudo-accelerazioni $Sa(T)$.

Le risposte in frequenza possono ancor più comodamente essere tracciate in diagramma bilogaritmico (Fig. 7) attraverso segmenti di rette, per cui risulta poi facilissimo ricostruirne la funzione interpolatrice in forma monomia:

$$r(t) = r_o + k(t_o - t) \qquad (1)$$

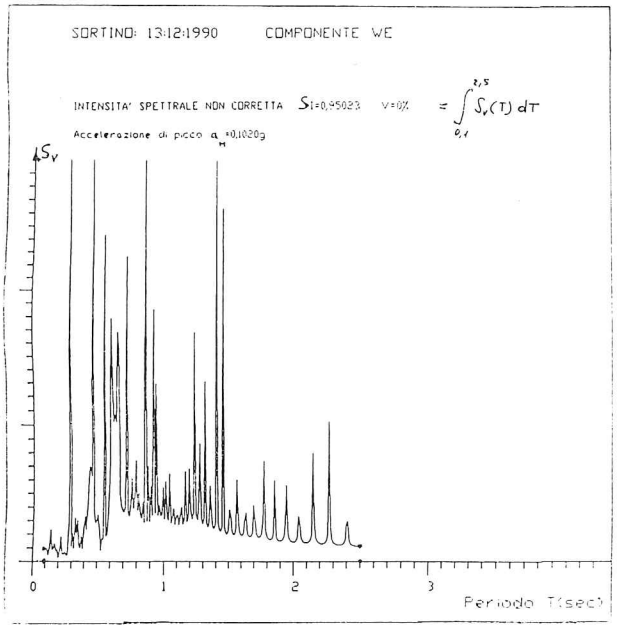


Fig. 3

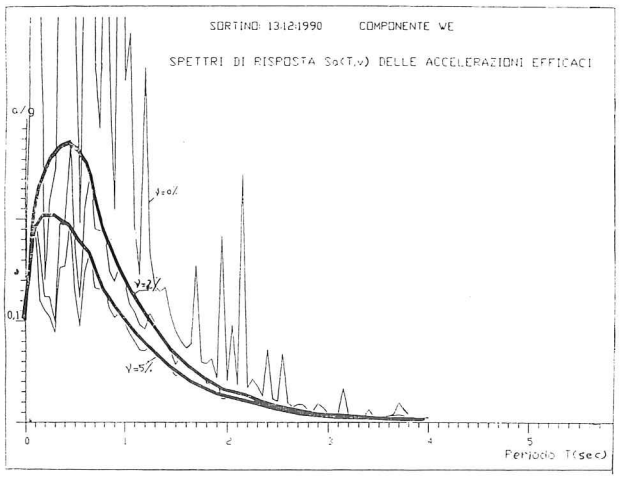


Fig. 4

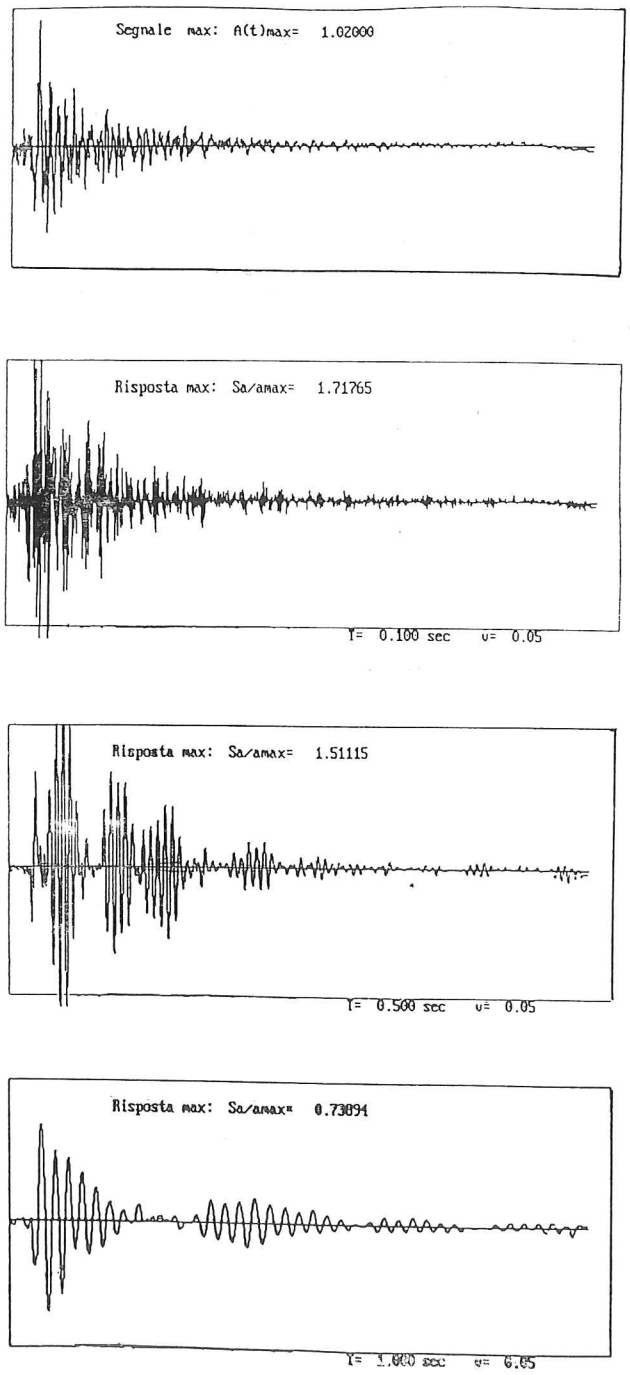


Fig. 4-bis

in cui si è posto:

$$t = log\ (T) \quad \text{ed} \quad r = log\ (R)$$

essendo R_o la massima amplificazione riferita all'accelerazione di picco a_p in corrispondenza del periodo di inizio di attenuazione T_o, da cui si ricava:

$$k = [r\ (t) - r_o]\ /\ (t_o - t) \qquad (2)$$

Dalla forma analitica dei suddetti segmenti di rette è ricavabile poi per trasformazione anti-logaritmica della relazione (1) la forma monomia che, a partire dal periodo di inizio di attenuazione T_o, definisce la curva esponenziale:

$$R\ (T) = R_o{}^*\ (T_o/T)^k \qquad (3)$$

Il fattore di attenuazione esponenziale k può quindi in generale essere desunto da:

$$k = \log\ [R\ (T)\ /\ R\ (T_o)]\ /\ \log\ (T_o/T) \qquad (4)$$

La risposta risulta allora definita da:

$$Sa\ (T) = a_p{}^*\ R\ (T) \qquad (5)$$

Per il sisma in oggetto si sono determinati pertano i seguenti valori al bedrock ideale (Fig. 4 e 7):

accelerazione di picco:

$$a_p = 0{,}1025\ g$$

acciaio $\nu = 2\%$:

$$T_o = 0{,}6\ \text{sec} \quad R_o = 2{,}0 \quad k = 2{,}58$$

cemento armato $\nu = 5\%$:

$$T_o = 0{,}7\ \text{sec} \quad R_o = 1{,}7 \quad k = 2{,}55$$

Infine si riportano tutte le risposte analizzate su diagramma tetralogaritmico per un immediato confronto sinottico delle relazioni pseudoarmoniche *Sa, Sv, Sd* (Fig. 8).

Si è quindi passati al confronto con lo spettro di progetto indicato dalle Norme Tecniche Italiane, che può notoriamente essere espresso nella forma (3) che *in fase elastica lineare,* riferita a smorzamenti relativi ν del 5%, comporta per sisma di prima categoria:

$$a_p = 0{,}1\ g$$

$$\nu = 5\% \quad T_o = 0{,}8\ \text{sec} \quad R_o = 1{,}0 \quad k = 0{,}666$$

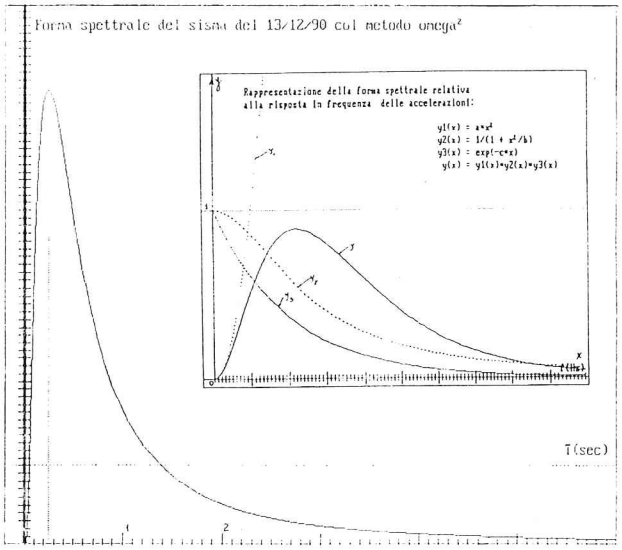


Fig. 5

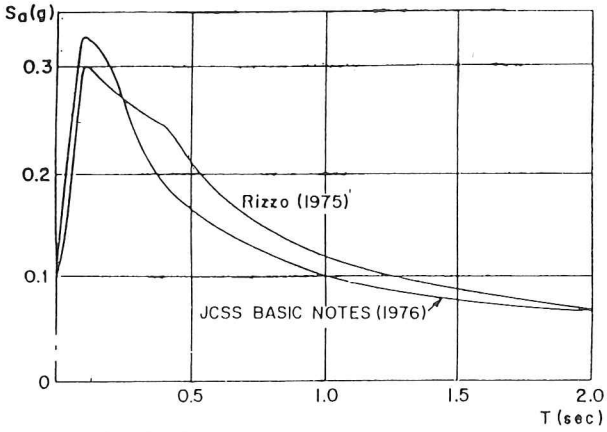


Fig. 6 - Spettri di risonanza su roccia

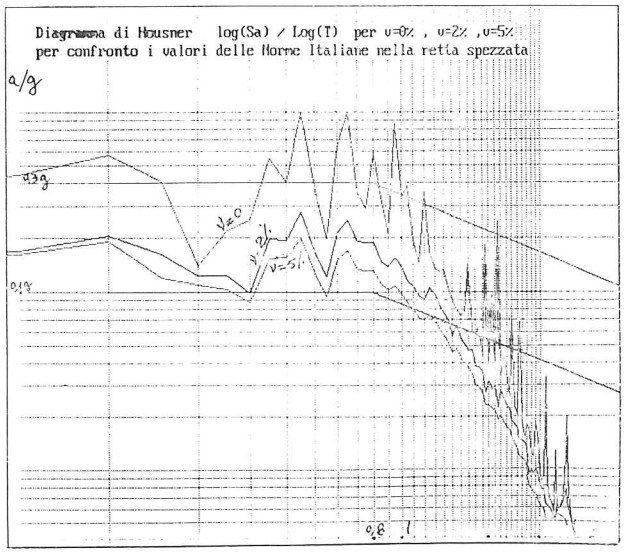


Fig. 7

Si può pertanto osservare che il sisma del 13 dicembre 1990 già in fase elastica ha prodotto risposte superiori al 70% di quelle contemplate dal Regolamento Italiano per zone di prima categoria.

In effetti il Regolamento Italiano definisce lo spettro di risposta nel dominio dell'elasticità lineare e quindi, supponendo che le strutture debbano resistere, almeno per una sola volta nella loro vita, al sisma di progetto senza collassare, queste dovranno sopportare in campo elasto-plastico, atteso il giusto grado di duttilità, accelerazioni di picco di valore almeno triplo di $a_p = 0{,}1\,g$, ossia: $a_p = 0{,}3\,g$.

Questo significa in pratica che le attuali costruzioni hanno reagito oltre la fase elastica lineare.

Le raccomandazioni del C. N. R. (edizione dicembre 1984) porgevano due profili distinti, denominati S1 ed S2, a seconda del tipo di terreno, rispettivamente rigido o soffice e tre distinte fasce di severità così distinte:

— Zona F:	sismicità forte	S = 12	$a_p = 0{,}35g$
— Zona M:	sismicità media	S = 9	$a_p = 0{,}25g$
— Zona B:	sismicità bassa	S = 6	$a_p = 0{,}15g$

tipo di terreno	T_o (sec)	R_o	k
S1	0,35	2,5	1
S2	0,80	2,2	1

Dagli studi eseguiti sul terremoto dell'11 gennaio 1693, come già accennato, è lecito riferirsi ad accelerazioni di picco dell'ordine di: $a_p = 0{,}4 \div 0{,}45g$!

Risulta in definitiva ragionevole attendere una riclassificazione del territorio interessato.

Analisi del contenuto in frequenza

La trasformazione di Fourier $A(T)$ del segnale orario $a(t)$ in termini di accelerazioni, mostra ancora la classica forma di curva a campana asimmetrica interpolabile analiticamente con vari modelli matematici: uno di questi è quello del Brune, detto ω^2 che affida alla funzione $y(x) = y_1(x)^* \, y_2(x)^* \, y_3(x)$ il compito di rappresentare tale curva nel diagramma Ampiezze/frequenze (vedi Fig. 5).

La natura di tale forma è attribuibile prima di tutto a parametri geofisici, quali: raggio terrestre, densità e velocità di propagazione delle onde S nella litosfera, ecc., e successivamente ai parametri sismici quali la distanza ipocentrale R_i, il momento sismico M_o e la frequenza di taglio f_c e i fattori di attenuazione anelastica k. Oltre che le massime

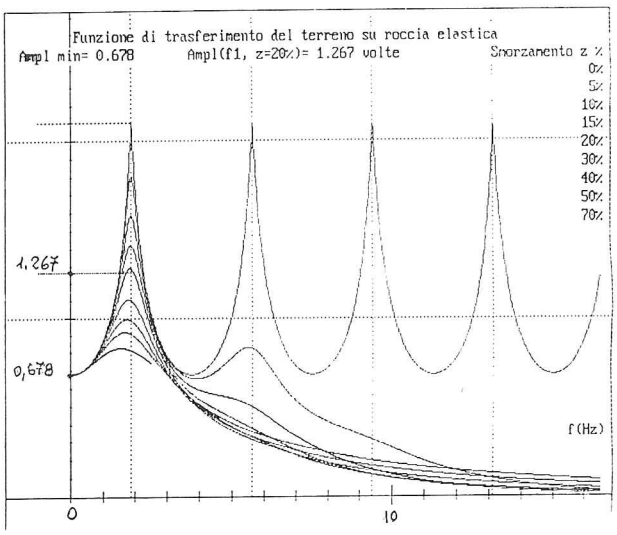


Fig. 8

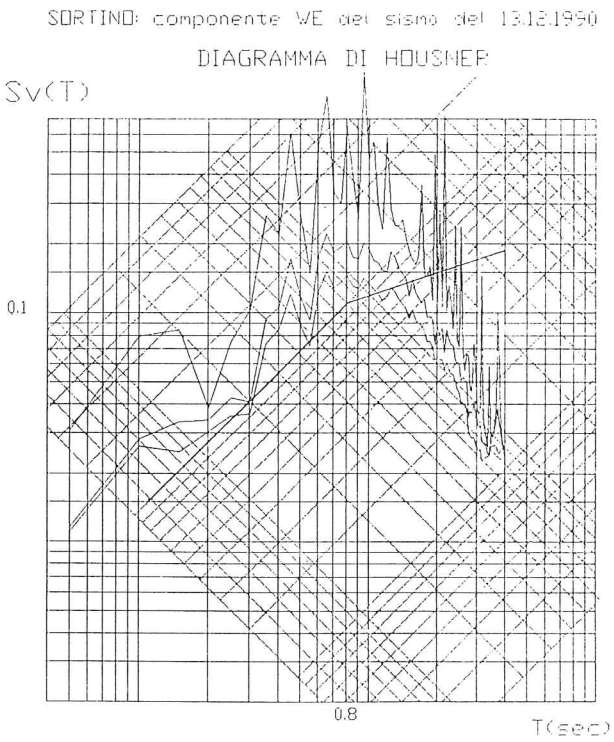


Fig. 9

ampiezze già studiate è quindi importante analizzare il contenuto in frequenza.

Dal punto di vista ingegneristico si può purtroppo osservare che l'intervallo in frequenza in cui si registrano le massime ampiezze delle accelerazioni sismiche, ironia della sorte, va a coincidere con quello delle frequenze proprie di risonanza delle usuali strutture edili, in ispecie con quelle in muratura: esso è infatti sostanzialmente circoscrivibile nel range compreso tra 0,5 e 10 Hz!

Accelerazioni di frequenza più elevata producono vibrazioni meccaniche rilevabili come semplici rumori, aventi cioè bassissima ampiezza e come tali staticamente non dannose.

Tutti i sismologi preferiscono illustrare le cose in funzione della frequenza, per noi ingegneri è invece più comodo riferirsi al periodo T, inteso come inverso della frequenza ed in un intervallo T compreso tra 0,1 e 2 secondi. Raramente, o nel caso di grandi strutture, si è in presenza di periodi propri superiori ai 2 secondi e comunque, al di sopra del secondo, la curva delle accelerazioni subisce un'attenuazione esponenziale: secondo il Regolamento Italiano, ad esempio, la risposta elastica corrispondente a $T = 2$ sec. è pari al 63% di quella relativa a $T = 1$ sec.

Per tali ragioni, nel calcolo strutturale, in molti casi può essere determinante l'analisi dinamica, con l'accortezza di utilizzare con molta oculatezza le tecniche ad essa associate: basti pensare alla vecchia questione circa i grossolani errori derivabili dalla tecnica SRSS contemplata dal Regolamento, e ad un miglior risultato ottenibile invece con la tecnica CQC.

Si è ricostruito pertanto un modello normalizzato ω^2 del *Brune* (1970) valutandone il coefficiente di massima amplificazione ed il fattore di attenuazione per le basse frequenze (Fig. 5) ed in definitiva la forma spettrale col suo contenuto in frequenza.

Succesivamente si è fatto il confronto con il modello standard del *Rizzo* (1975) e delle *JCSS Basic Notes* (1976) (Fig. 6), ottenuti dalle medie di svariati terremoti, riscontrando che questi ultimi hanno una evidente maggior ricchezza del contenuto in armoniche per le basse frequenze, dovuta al fatto che il terremoto del 13-12-1990 è stato fortemente caratterizzato da un alto fattore di attenuazione; questa anomalia a parere dello scrivente lascia adito ad interessanti ipotesi sul fenomeno di definizione del momento sismico M_o, connesso con l'altro grado di assorbimento di energia radiante, ma ogni ulteriore interpretazione esulerebbe dalle proprie personali competenze. Ci si sente soltanto di affermare che quest'ultimo terremoto non può di certo rappresentare la replica di quello dell'11 gennaio 1693 in termini di accelerazione di picco, né in termini di contenuto spettrale ma lascerebbe aperte nuove ipotesi di scenari sismici...

Fenomeni di amplificazione dinamica nella determinazione finale di un Terremoto di progetto

Le considerazioni sin qui esposte son servite alla definizione di un terremoto di progetto al bedrock, avente accelerazione di picco $a_p = 0{,}4$ g e forma spettrale normalizzata quella standard del Rizzo, essendo questa più severa di quella testè analizzata per il sisma del 13 dicembre 1990.

Per la definizione finale del terremoto di progetto occorre ancora valutare la risposta spettrale in superficie ed i fenomeni di amplificazione dinamica e di filtraggio di bande di frequenza, attraverso lo studio di apposite funzioni di trasferimento in frequenza così come accennato in premessa.

Per motivi di spazio non sarà possibile qui illustrare bene questa problematica, oggetto di futura pubblicazione; si sente però il dovere di affermare che tali studi non dovrebbero rappresentare una novità, in quanto databili intorno al 1970 (Roesset, Seed, Idriss, ecc....).

Qui si mostreranno semplicemente alcuni risultati ottenuti utilizzando le soluzioni complesse in forma chiusa del Roesset relative al modello continuo di strato definito di terreno soffice su roccia elastica indefinita.

Tale approccio serve per discriminare l'indirizzo delle soluzioni, che dovranno poi essere affinate in presenza di irregolarità geometriche.

I dati del problema possono ridursi alla conoscenza dello spessore H dello strato su-

perficiale e dei valori delle densità δ e delle velocità V_s delle onde di taglio per tale strato e per quello di roccia sottostante.

In Fig. 9 è rappresentata la funzione di trasferimento che individua risposte di tipo finito in corrispondenza delle frequenze di risonanza: tale risultato deriva dall'ipotesi di elasticità del bedrock, di sicuro molto più realistica.

Per ogni valore di smorzamento ζ del terreno resta individuata una risposta unitaria.

Come accennato in premessa, il problema è fortemente non-lineare e attraverso alcune iterazioni si arriva alle soluzioni che porgono quel valore ζ associato all'unico valore di scorrimento di taglio γ compatibile col massimo spostamento Sd del terreno in superficie prodotto da un definito valore di accelerazione di picco a_p, note che siano le curve sperimentali $G = G(\gamma)$ e $\zeta = \zeta(\gamma)$ dedotte dalle prove dinamiche di laboratorio.

Nelle Figure n. 10, 11, 12 si riproducono gli spettri di risposta « trasferiti » in superficie per tre situazioni differenti: argilla, sabbia, tufo.

La definizione di un terremoto di progetto in superficie non può essere definita a priori, ma dipende fortemente dal sito.

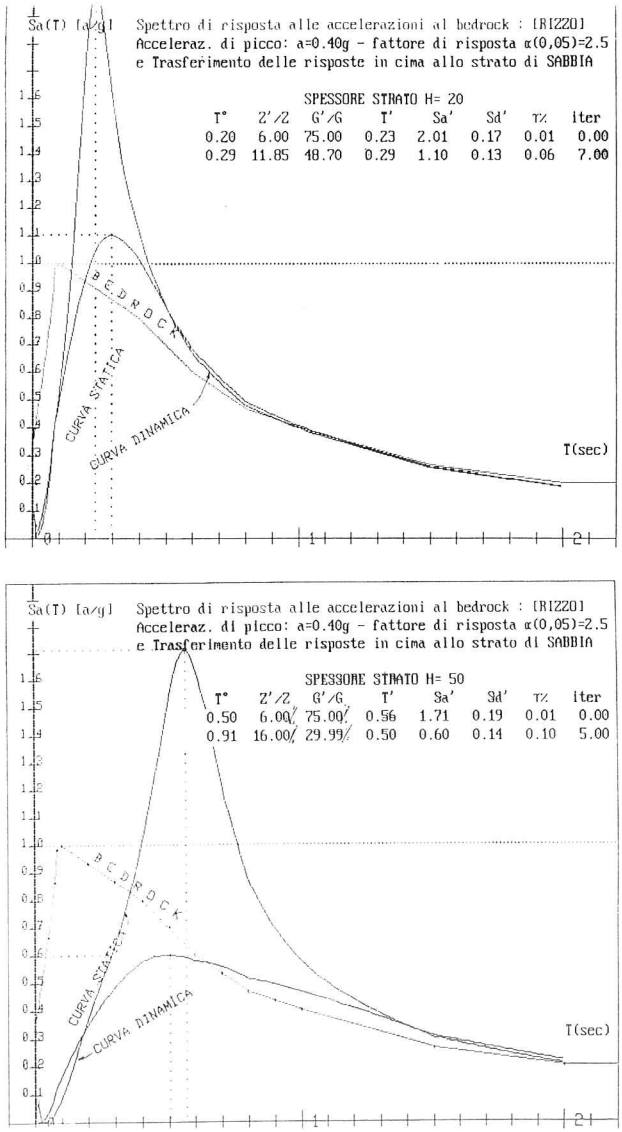


Fig. 10

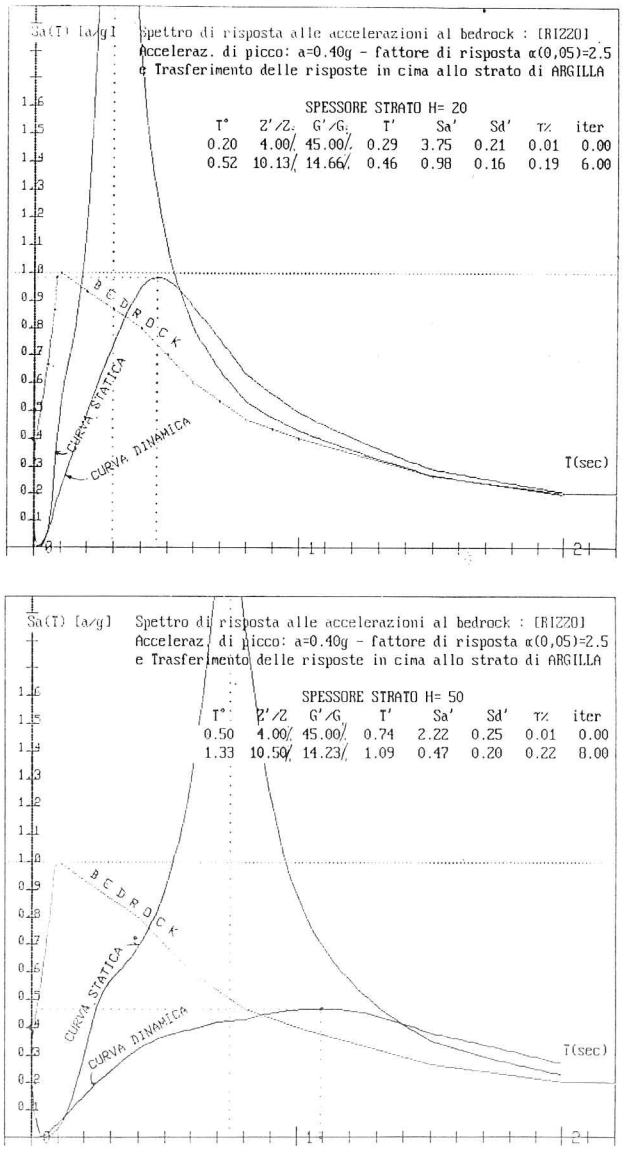
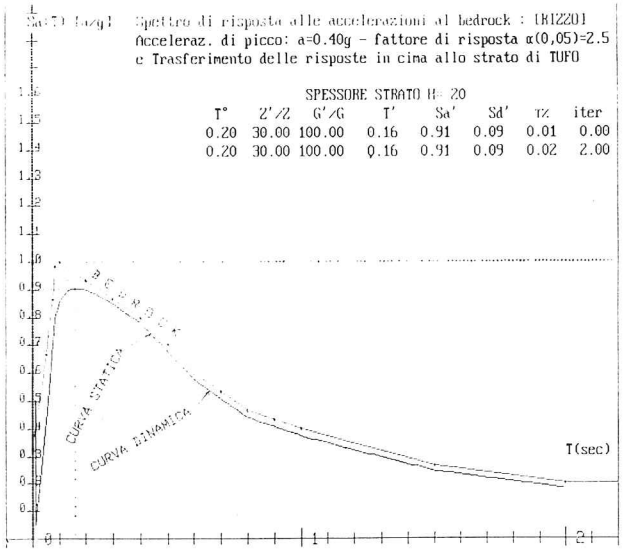


Fig. 11



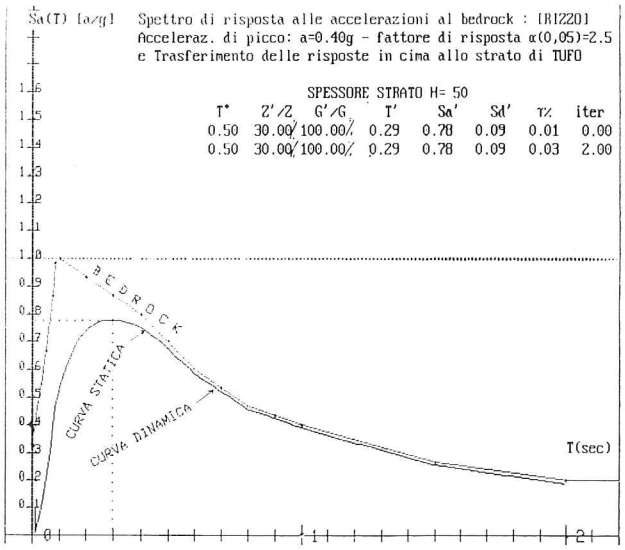


Fig. 12

Da sottolineare che i valori statistici di G che produrrebbero fortissime esaltazioni delle risposte, subiscono un forte abbattimento, eccetto che per il tufo, e che le risposte da prendere in considerazione sono solo queste ultime.

Si conclude affermando che la valutazione degli effetti di amplificazione superficiale va sempre effettuata utilizzando i parametri elastici compatibili con le accelerazioni di picco a_p di progetto.

Risultano pertanto *totalmente inutili* gli studi di microzonazione che forniscano mappe di suscettività dedotte da misure dirette o indirette di parametri geomeccanici di tipo solo statico e che non forniscano curve di risposte spettrali attendibili, in alternativa a quelle raccomandate dal C.N.R. (ed. 1984).

Questi comportamenti, accompagnati da un disinvolto impiego del metodo del Kanai di rilevamento dei microtremori sismici per risalire alle frequenze di risonanza degli strati superficiali del terreno, sono purtroppo prassi acquisita nella redazione degli studi geologici assunti a supporto dei nuovi Piani Regolatori Generali, le cui conclusioni conducono spesso a contraddittorie ed errate prescrizioni di coefficienti sismici, materia questa del resto di esclusiva competenza del Ministero dei LL.PP.

È auspicabile pertanto una censura definitiva di tali comportamenti ascientifici!