

## ACCELEROGRAMMI ARTIFICIALI NELLE ANALISI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE

### ARTIFICIAL ACCELEROGRAMS IN LOCAL SEISMIC AMPLIFICATION ANALYSES

TITO SANO<sup>(\*)</sup> & ANTONIO PUGLIESE<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> ENEA-DISP - Professor of the Master "Evaluation Control and Reduction of Environmental Seismic Risk" Sapienza University of Rome - Rome, Italy

<sup>(\*\*)</sup> ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - Rome, Italy - Professor of the Master "Evaluation Control and Reduction of Environmental Seismic Risk" Sapienza University of Rome - Rome, Italy

#### RIASSUNTO

In questo rapporto vengono mostrati i risultati di analisi di amplificazione sismica per una microzonazione in due casi: nel caso di utilizzo di più accelerogrammi e in quello di un accelerogramma artificiale entrambi compatibili con lo stesso spettro di riferimento. Viene effettuata una analisi parametrica su suoli tipici modificando sia i parametri meccanici e geometrici sia il livello di accelerazione. I risultati delle analisi mostrano che esistono solo modeste e trascurabili differenze rispetto alle incertezze insite in tutti i parametri in gioco.

**TERMINI CHIAVI:** *amplificazione sismica locale, microzonazione, accelerogrammi artificiali, time histories*

#### INTRODUZIONE

La microzonazione sismica ha avuto un forte sviluppo negli ultimi 50 anni in Italia a livello sia di studi sia di applicazione specialmente dopo gli intensi terremoti recenti a partire da quello dell'Umbria Marche del 1997-98, a quello di San Giuliano di Puglia del 2002 fino a quello de L'Aquila del 2009. Contemporaneamente si sono sviluppate linee guida regionali: Lombardia, Emilia Romagna, Lazio (REGIONE LOMBARDIA, 2005; ATTO DI INDIRIZZO, 2007; BOLLETTINO UFFICIALE DELLA REGIONE LAZIO, 2010) ed altre che hanno fornito sia procedure, sia dati di base. Tra questi vengono fissati sia gli spettri di riferimento su roccia di base (*bedrock*) sia degli accelerogrammi naturali con essi compatibili e nel contempo viene, più o meno tacitamente, sconsigliato l'uso di accelerogrammi artificiali. Per altro l'uso di un solo accelerogramma artificiale, invece di più naturali, ridurrebbe il numero di analisi di amplificazione sismica per la microzonazione, che risultano spesso gravose nei casi di configurazioni del terreno complesse.

Nella normativa sismica vigente (NTC-08,2008) è prescritto che per le opere geotecniche siano usati solo accelerogrammi naturali, che non sono esclusi per le analisi strutturali, ma non viene citato esplicitamente il caso di microzonazione sismica. Solo successivamente nelle istruzioni per l'applicazione delle norme tecniche (CIRCOLARE 2 FEBBRAIO 2009, N. 617) si prevede anche per le analisi di amplificazione sismica l'uso di soli accelerogrammi naturali perché *'Gli accelerogrammi artificiali spettro-compatibili sono*

#### ABSTRACT

This report compares the results of analyses of seismic amplification for microzonation in two cases: the first one refers to the use of natural accelerograms while the second one to the use of an artificial accelerogram as bedrock outcropping inputs respectively. Realistic soil schemes and different levels of peak ground acceleration (PGA) were considered. The results show only small differences between the values of amplification such as to be negligible compared to the inherent uncertainties related to the allset of parameters considered in the analyses.

**KEY WORDS:** *local seismic amplification, microzonation, artificial accelerograms, time histories*

#### INTRODUCTION

The seismic microzonation has had strong growth over the past 50 years in Italy in terms of both studies and applications, especially after the recent strong earthquakes of the Umbria Marche, 1997-98, San Giuliano di Puglia, 2002, and L'Aquila, 2009. Recently regional guidelines have developed: Lombardy, Emilia Romagna, Lazio (REGIONE LOMBARDIA, 2005; ATTO DI INDIRIZZO, 2007; BOLLETTINO UFFICIALE DELLA REGIONE LAZIO, 2010) and others, that have provided both procedures, and basic data useful for seismic microzonation analysis. Among these, reference spectra on bedrock and natural accelerograms compatible with them are established; at the same time the use of artificial accelerograms is more or less tacitly discouraged. Furthermore the use of a single artificial accelerogram, instead of numerous natural accelerograms, would reduce the number of seismic amplification analyses that can be very difficult in cases of complex configurations of the ground. The Italian seismic code (NTC-08, 2008) requires that only natural accelerogram should be used for 'geotechnical systems' but nothing is written explicitly in the case of seismic microzonation. On the contrary, artificial ones can be used for structural analysis. Only later in the instructions for the application of technical standards (CIRCOLARE 2 FEBBRAIO 2009, N. 617) only natural accelerograms are expected to be used for the seismic amplification because *'The artificial spectrum-compatible accelerograms are characterized by frequency content unrealistic,*

*infatti caratterizzati da contenuti in frequenza irrealistici, poiché gli spettri di risposta di progetto su cui essi sono calibrati sono ottenuti da involucri di spettri di risposta di numerosi eventi reali. Conseguentemente, gli accelerogrammi artificiali sono caratterizzati da una banda di frequenze irrealisticamente ampia. L'uso di accelerogrammi artificiali in un'analisi di risposta sismica può produrre un'amplificazione contemporanea, e perciò poco realistica, dei diversi modi di vibrazione del sistema, mentre un'azione sismica reale, caratterizzata da una larghezza di banda modesta, amplifica un limitato numero di modi, o al limite un unico modo*. D'altronde negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica della Protezione Civile (GRUPPO DI LAVORO, 2008) viene data libertà di scelta nella definizione del moto sismico di riferimento.

Lo scopo di questo lavoro è quello di confrontare, nelle analisi di amplificazione sismica locale per la microzonazione, i risultati che si ottengono utilizzando come input più accelerogrammi naturali compatibili con uno spettro di risposta di riferimento oppure un singolo accelerogramma artificiale ottenuto da quest'ultimo. Naturalmente il prodotto finale in una microzonazione sismica è uno solo, cioè il fattore di amplificazione, sia nel primo caso come valor medio sia nel secondo.

## METODOLOGIA

Lo studio si è sviluppato in tre fasi. Nella prima fase sono state considerate configurazioni di terreno plausibili con profili di velocità crescente da 200 m/s in superficie fino a 800 m/s a contatto con il bedrock. Sono stati variati sia la profondità del bedrock, da 30 a 60 m, sia il materiale: sabbia o argilla, sia il livello di eccitazione sismica in termini di PGA. Nella seconda fase sono stati variati i profili di velocità lasciando costante la profondità a 30 m e considerando un solo tipo di terreno, cioè la sabbia. La terza fase è identica alla seconda, ma è stato considerato un livello esagerato e quindi fittizio di accelerazione massima del moto di riferimento in modo da mettere in evidenza l'effetto della non linearità che risulta essere il parametro più importante.

Si è approfittato del fatto che in alcune Regioni sono stati definiti, in ogni comune, gli accelerogrammi naturali da utilizzare per le analisi di amplificazione sismica locale; in particolare in Emilia-Romagna e nel Lazio.

Sono state scelte due località in Emilia-Romagna e una nel Lazio, in modo da avere un ventaglio ampio di accelerazioni massime sul terreno di riferimento: 0.10, 0.2 e 0.26 g.

- In ogni località sono stati calcolati gli spettri di risposta degli accelerogrammi naturali e calcolato il loro valor medio.
- Dallo spettro medio è stato calcolato l'accelerogramma artificiale con esso compatibile.
- È stata calcolata la risposta sismica locale (con SHAKE91) in superficie sia per tutti gli accelerogrammi naturali, sia per l'unico artificiale. È stato usato un programma di calcolo numerico monodimensionale in uno schema del terreno a strati piani e paralleli, SHAKE91 (IDRISS & SUN, 1992). Non è stato considerato l'effetto

*since the design response spectra on which they are calibrated is an envelope of response spectra of a numerous real events. Consequently, the artificial accelerograms are characterized by an unrealistically large frequency band. The use of artificial accelerograms for seismic response analysis can produce simultaneous amplification, and therefore not very realistic, of the different vibration modes of the system, while the real seismic action, characterized by a low-bandwidth, amplifies a limited number of modes, or at least only one mode*. Besides in the 'Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica', guidelines and criteria of National Civil Protection, (GRUPPO DI LAVORO, 2008), free choice of the accelerograms is given in the definition of the reference seismic motion.

The purpose of this paper is to compare, in the analysis of local seismic amplification for microzonation, the results obtained by using, as input, several natural accelerograms compatible with a response spectrum or a single artificial accelerogram derived from such spectrum. Of course, the final product in a seismic microzonation is only one, that is, the amplification factor as a mean value in the case where several natural accelerograms are considered or a single value in the case where analysis are performed by the use of a single artificial accelerogram.

## METHODOLOGY

The study was developed in three phases. In the first phase, plausible configurations of soil profiles with increasing shear wave velocity from 200 m/s at the surface up to 800 m/s at the contact with the bedrock have been considered. The following parameters have been changed: the depth of the bedrock, from 30 to 60 m, the soil type, sand or clay and the level of the seismic excitation in terms of PGA. In the second phase, velocity profiles have been changed allowing a constant depth of 30 meters and only one type of soil, ie the sand. The third phase is identical to the first one, but an exaggerated level of PGA was considered in order to highlight among all the effect of the nonlinearity.

We took advantage of the fact that natural accelerograms have been defined in some regions of Italy, in every municipality, for the analysis of local seismic amplification, in particular in Emilia-Romagna and Lazio. We have chosen two municipalities in Emilia-Romagna and only one in Lazio, have a wide range of maximum accelerations for the reference ground motions: 0.10, 0.2 and 0.26g.

- At each location response spectra of the natural accelerograms and their average value were computed,
- An artificial accelerogram compatible with the so-obtained average spectrum was computed.
- The local seismic response on the surface was valued both for the natural accelerograms and for the artificial accelerogram. Only a 1D code is used, SHAKE91 (IDRISS & SUN, 1992), since this study has been limited to the response of horizontally stratified soils. We do not take into account the effects caused by the

dell'aumento della pressione interstiziale poiché le linee guida regionali prevedono studi particolari per studiare tale fenomeno.

- È stato calcolato lo spettro medio della risposta agli accelerogrammi artificiali e lo spettro della risposta all'accelerogramma artificiale.
- Infine sono stati confrontati i due spettri ed i corrispondenti fattori di amplificazione.

Dalla regione Emilia-Romagna sono forniti tre accelerogrammi naturali per ogni sito e per la scelta degli accelerogrammi per le analisi sono state scelte le città di Castrocaro Terme (PGA=0.209) e Comacchio (PGA=0.101g).

Dalla regione Lazio sono forniti cinque accelerogrammi per ogni sito ed è stata scelta la città di Cittareale (PGA=0.26 g).

### GENERAZIONE DI ACCELEROGRAMMI ARTIFICIALI

La tecnica utilizzata per creare degli accelerogrammi artificiali spettro compatibili è una versione modificata della metodologia proposta da Silva (SILVA, 1987). Il vantaggio di questa tecnica consiste nell'incorporare in modo naturale la non stazionarietà, la casualità e la variazione nel tempo del contenuto in frequenza di accelerogrammi registrati. Questa caratteristica delle *time-histories* si ottiene conservando la fase delle registrazioni, in quanto la fase determina come l'energia si distribuisce nel tempo, e modificandone l'ampiezza in modo da rendere gli accelerogrammi spettro compatibili. Per tanto l'ampiezza per ogni frequenza viene definita a partire dallo spettro di risposta con tecniche iterative.

### ANALISI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE

Per le analisi di amplificazione sismica locale sono stati scelti dei profili di velocità tipici non potendo, ovviamente, effettuare una analisi statistica ad ampio raggio.

Nella figura 1 sono riportati i diagrammi delle curve di decadimento dei terreni presi in considerazione, sabbie ed argille. La scelta è stata dettata dalla volontà di considerare due terreni con evidente differente comportamento.

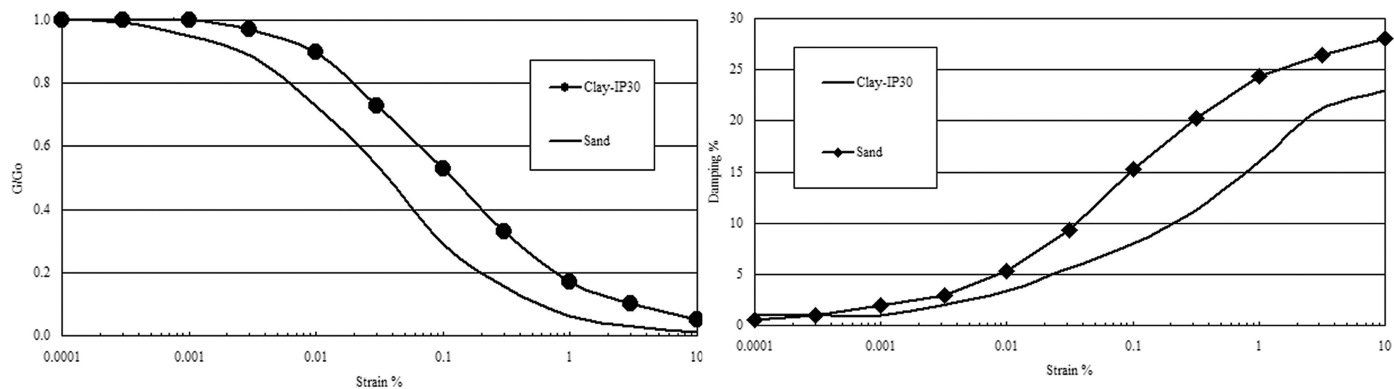


Fig. 1 - Curve di decadimento per la sabbia e l'argilla  
- Decay curves for clay and sand

pore pressure generation because the regional guidelines have additional special analyzes to examine this phenomenon.

- The average response spectrum of output natural accelerograms and spectrum of the artificial accelerogram response were calculated.
- Finally we compared the two spectra and the corresponding amplification factors

The Emilia-Romagna region provides three natural accelerograms for each site. For the selection of accelerograms for analysis, Castrocaro Terme (PGA = 0.209) and Comacchio (PGA = 0.101g) municipalities were selected.

The Lazio region provides five accelerograms for each site and city of Cittareale (PGA = 0.26 g) was chosen.

### GENERATION OF ARTIFICIAL ACCELEROGRAMS

The technique used to create artificial spectrum-compatible accelerograms is a modified version of the methodology proposed by Silva (SILVA, 1987). The advantage of this technique is to incorporate in a natural way the non-stationary, randomness and variation over time of the frequency content of recorded accelerograms. Such feature of time-histories is obtained by keeping the phase of the recordings, since the phase determines how the energy is distributed over time, and changing the amplitude to make the accelerograms compatible a given spectrum. The amplitude for each frequency is defined starting from the response spectrum with iterative techniques.

### ANALYSIS OF LOCAL SEISMIC AMPLIFICATION

For the analysis of local seismic amplification few soils with typical velocity profiles were chosen. But we are conscious that a limited statistical analysis can be enough to get a good idea of the phenomenon and reach the aim.

Figure 1 shows the diagrams of the decay curves of the soil types here considered. The choice was suggested by the will to consider two soils with evident different material behavior.

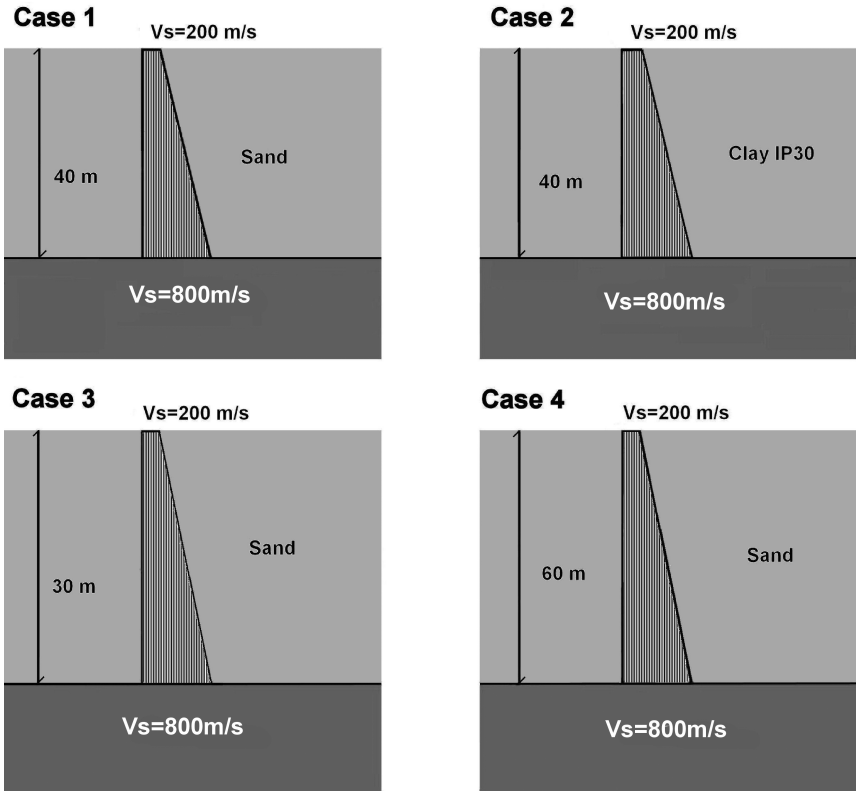


Fig. 2 - Profili di velocità della prima fase  
 - Velocity profiles for the systems considered in the first phase

*Prima fase*

Nella figura 2 sono riportati alcuni dei profili considerati nella prima fase.

Nella figura 3 sono riportati gli spettri di risposta e la loro media per una accelerazione massima di input di 0.26g (Cittareale). Si nota la differenza tra gli spettri dei singoli accelerogrammi sia come ampiezza sia come contenuto di frequenza. Ancor più si evidenzia la differenza con lo spettro medio al quale i singoli fanno riferimento.

Nelle figure successive sono riportati solo i risultati cioè i confronti tra lo spettro medio tra i naturali e lo spettro nel caso di accelerogramma artificiale.

Dal confronto tra gli spettri in figura 4<sub>A</sub> e 4<sub>B</sub> risulta la piccola influenza del tipo di terreno, infatti in tutti e due i casi lo spettro medio è molto simile a quello artificiale. Lo stesso risultato si evidenzia esaminando direttamente i fattori di amplificazione per la microzonazione. Sono stati calcolati sia il fattore FA descritto negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica sia il fattore FH sia FN:

FN è il rapporto tra i valori medi degli spettri di accelerazione negli intervalli di periodo da 0.1 a 0.5 s:

$$FN = \int_{0.1}^{0.5} SA_o \, dT / \int_{0.1}^{0.5} SA_i \, dT$$

dove i pedici o ed i fanno riferimento ai valori di output ed input degli spettri di risposta SA.

*First phase*

In Figure 2 the velocity profiles for the systems considered in the first phase are shown:

Figure 3 shows the response spectra of natural accelerograms and their mean in Cittareale (maximum acceleration of 0.26g as input).

Note the difference between the spectra of the individual accelerograms both in amplitude and frequency content. Also evident is the difference with the average spectrum to which they refer.

In the other figures only comparisons between the average spectrum of natural accelerograms and the spectrum of the single artificial accelerogram are reported.

The comparison between the spectra in figures 4a and 4b shows the small influence of soil type, because in both cases the average spectrum is very similar to the artificial one. The same result is evident by examining directly the amplification factors for microzonation, i.e. FA, FH and FN. FA factor was calculated as described in the guidelines and criteria for the seismic microzonation, FN is the ratio between the mean values of the acceleration in the period range from 0.1 to 0.5 s:

where the subscripts, o and i, refer to the output and input values of the SA response spectra.

Fig. 3 - Spettri di risposta degli accelerogrammi in superficie e loro media nel caso di  $PGA=0.26g$   
 - Response spectra of natural accelerograms and their mean in case  $PGA=0.26g$

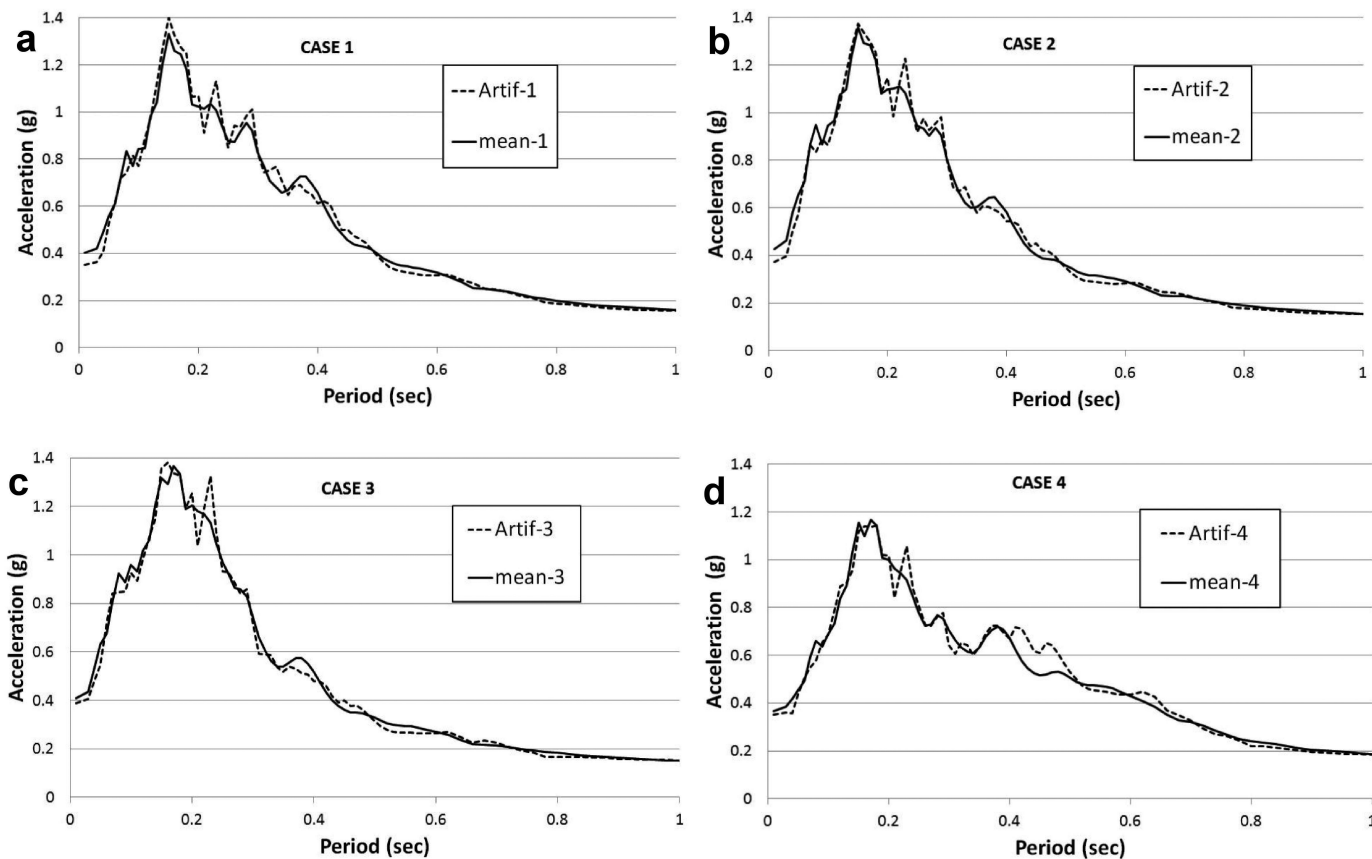
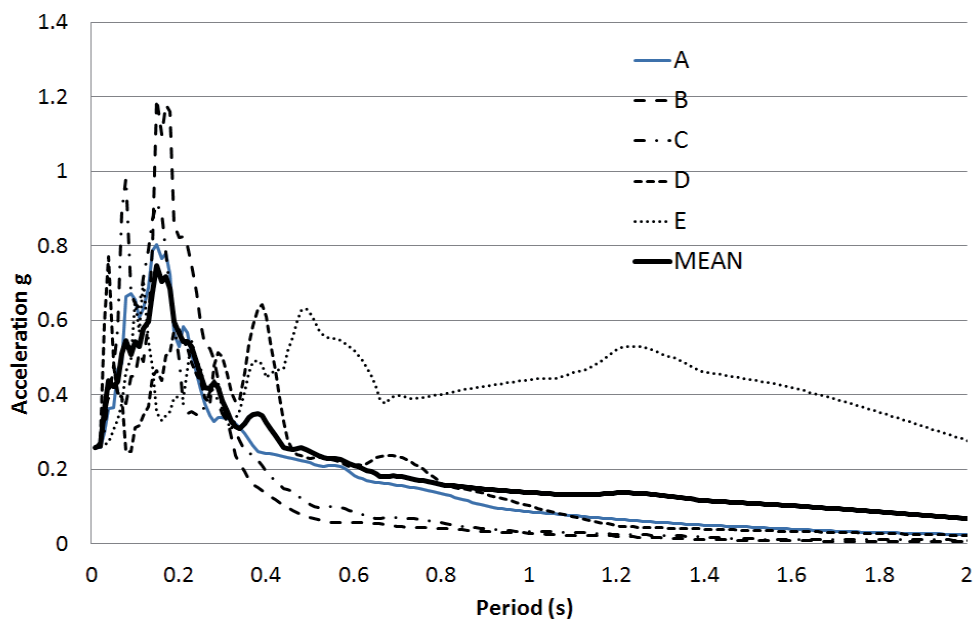


Fig. 4 - Risultati dei quattro casi sella fase I  
 - Results of the four cases of Phase I

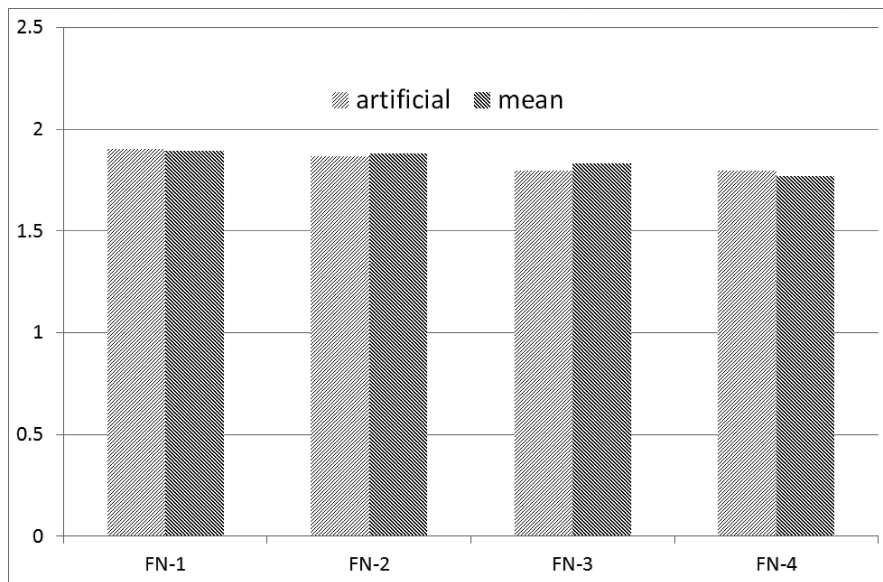


Fig. 5 - Fattori di amplificazione FN per tutti i casi della figura 2  
- FN amplification factors for all cases in Figure 2

Lo stesso rapporto vale anche nel caso di FH: rapporto di Housner, purché si cambi lo spettro di accelerazione SA con quello di pseudovelocità SV. Nel seguito saranno mostrati solo i fattori FN perché i risultati non cambiano sostanzialmente per gli altri.

I fattori sono riportati nella figura 5 per tutti i quattro casi della figura 2.

Come si vede in tutti i casi la differenza è minore del 2.5% che è, a sua volta, minore della massima differenza dei fattori di amplificazione dei singoli spettri di risposta naturali ed il loro valore medio, cioè il 10.3%. E' da notarsi inoltre che passando da un terreno sabbioso a uno argilloso la variazione sia in valore assoluto sia in percentuale non è apprezzabile.

Lo stesso risultato si ottiene anche per gli altri due livelli di eccitazione sismica:Castrocaro Terme(PGA=0.209) e Comacchio (PGA=0.101g). Nella tabella seguente sono confrontati i valori di amplificazione sismica nei due casi a confronto: tra la media di più accelerogrammi naturali ed uno artificiale. La massima differenza risulta essere inferiore al 5%.

	artif1- 0.26g	mean1- 0.26g	artif2- 0.21g	mean2- 0.21g	artif3- 0.1g	mean3- 0.1g
FN-1	1.902	1.892	1.980	1.912	1.950	1.917
FN-2	1.867	1.880	1.937	1.877	1.923	1.876
FN-3	1.794	1.832	1.839	1.781	1.793	1.740
FN-4	1.795	1.768	1.902	1.828	1.994	1.941

I valori FN-1,FN-2,FN-3,FN-4 fanno riferimento ai quattro profili di velocità mentre 1,2,3 fanno riferimento ai tre livelli di accelerazione rispettivamente 0.26, 0.2, 0.1 g.

#### Seconda fase

Nella seconda fase è stato considerato il solo livello di accelerazione massimo, cioè 0.26g, la profondità del bedrock pari a 30 m,

The same ratio also applies in the case of FH, Housner ratio, as long as you change the spectrum of acceleration,SA, with that of pseudovelocity SV. In the following only the FN factor will be shown because the results do not change substantially each other's.

The factors are shown in Figure 5 for all four cases of Figure 2.

As can be seen in all cases the difference is less than 2.5% which is, in turn, less than the maximum difference of amplification factors of the individual natural response spectra and their average value, ie 10.3%. It is also to be noted that passing from a sandy soil in a clay soil the variation in both absolute terms and in percentage is not appreciable. The same result is obtained for the other two levels of seismic excitation Castrocaro Terme (PGA = 0.209) and Comacchio (PGA = 0.101g). The following table compares the values of seismic amplification in the two cases in comparison between the average of the most natural and an artificial accelerograms. The maximum difference is less than 5%.

The values FN-1,FN-2,FN-3,FN-4 refer to the four velocity profiles and 1,2,3 refer to the three levels of acceleration, respectively 0.26,0.2,0.1g.

#### Second phase

In the second phase the following parameters were kept constant: the maximum level of acceleration, ie 0.26g, the depth of the bedrock

un terreno sabbioso ed un bedrock con  $V_s=800$  m/s, mentre è stato variato il profilo di velocità nei 30m. Tale scelta deriva dai risultati della prima fase nella quale la massima differenza si ottiene nella condizione di massima non linearità. Sono state considerate quattro condizioni:

- Profilo costante con una velocità pari a 350 m/s,
- Profilo con il gradiente minimo con  $V_s$  crescente da 300 a 400 m/s,
- Profilo con il gradiente medio con  $V_s$  crescente da 250 a 450 m/s,
- Profilo con il gradiente maggiore con  $V_s$  crescente da 200 a 500 m/s.

I risultati sono sintetizzati sia nelle figure seguenti sia nella tabella successiva.

Al crescere del gradiente diminuisce la differenza tra gli spettri specialmente nell'intorno del periodo proprio del terreno. Ciò è molto evidente nella fig. 6A corrispondente ad un profilo costante per il quale la non linearità è concentrata alla base della colonna di terreno. Lo si può notare anche nella tabella II seguente dove sono mostrati i fattori di amplificazione e la loro differenza:

of 30 m, a sandy soil and a bedrock having a  $V_s = 800$  m/s. The velocity profile was changed in the 30m soil depth. Such choice derives from the results of the first phase in which the maximum difference is obtained in condition of maximum non-linearity.

Four conditions were considered:

- Constant profile with a velocity of 350 m / s,
- Profile with a minimum gradient with  $V_s$  increasing from 300 to 400 m/s,
- Profile with an average gradient with  $V_s$  increasing from 250 to 450 m/s
- Profile with a major gradient with increasing  $V_s$  from 200 to 500 m/s

The results are summarized in the following figures and in the next table

The difference between the spectra decreases with increasing the gradient, especially in the period range near the natural period of the ground. This is quite evident in figure 6A that corresponds to a constant profile for which the nonlinearity is concentrated at the base of the soil column. It can also be seen in Table II where the amplification factors and their difference are shown:

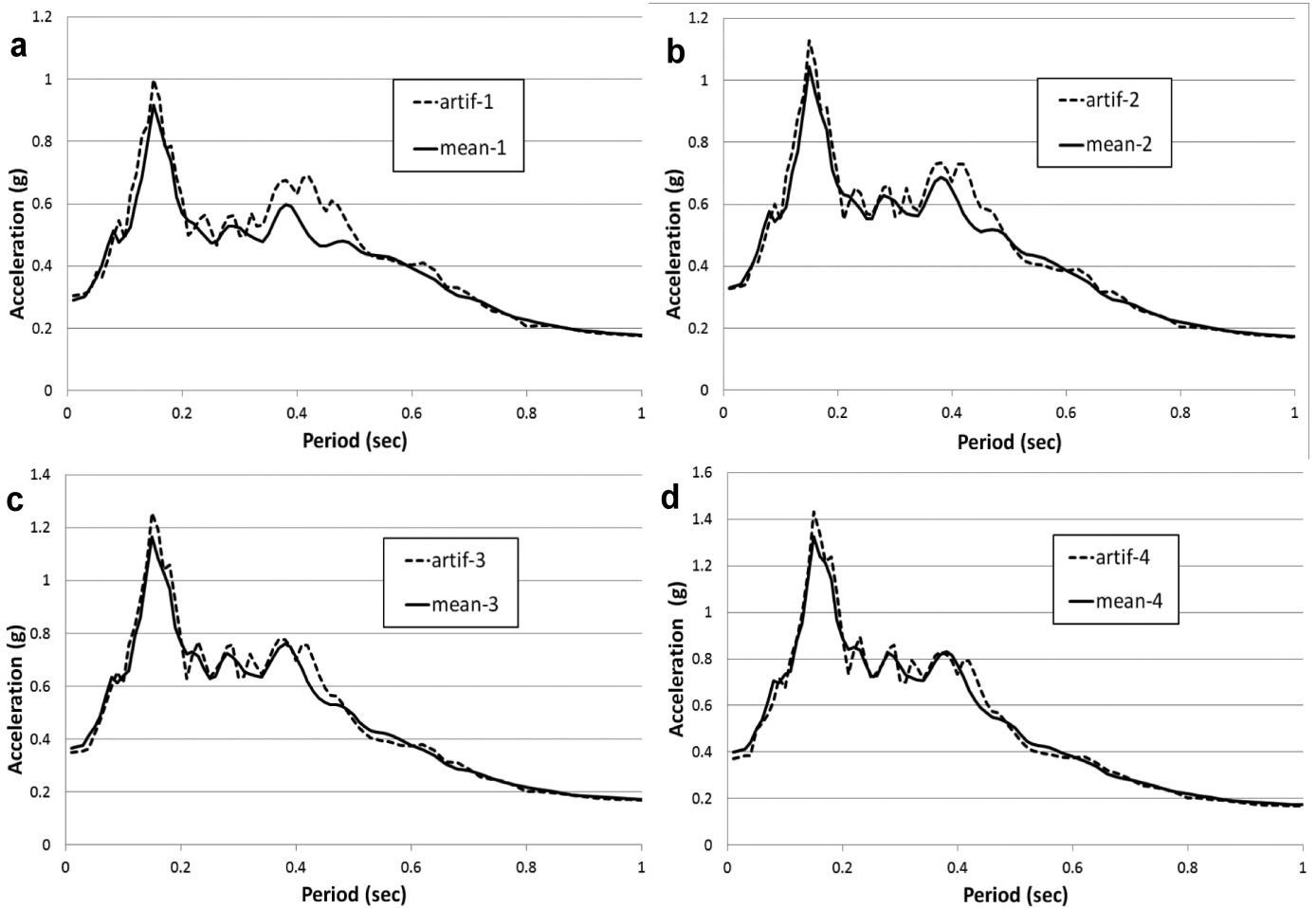


Fig. 6 - Risultati dei quattro casi della fase 2  
 - Results of the four cases of Phase 2

	constant profile	minimum gradient	mean gradient	major gradient
FN-mean nat.	1.31	1.50	1.67	1.87
FN-artificial	1.44	1.58	1.72	1.89
difference%	9.54	5.27	3.08	1.34

Si vede che passando dal profilo costante fino al gradiente massimo la differenza diminuisce dal 9.5 al 1.34% ma la differenza in assoluto si mantiene al di sotto di 0.13. I fattori FN nel caso di accelerogrammi artificiali sono sempre i maggiori.

### Terza fase

Si è passati fittiziamente da un livello di massima accelerazione di 0.26g a 0.4g applicando un fattore moltiplicativo all'input usato nella seconda fase allo scopo di evidenziare l'effetto di non linearità. Si è agito sulle configurazioni della seconda fase perché per esse si sono rilevate le maggiori differenze tra i risultati. Nella tabella III sono riportati sinteticamente i valori di attenuazione FN calcolati.

	Costant profile	Minimum gradient	Average gradient	Major gradient
FN-mean nat.	1.17	1.35	1.56	1.75
FN-artificial	1.34	1.49	1.48	1.79
difference%	14.2	9.98	4.6	1.8

Come si vede che anche in questo caso la differenza è inferiore al 10% escluso nel caso, che deve essere considerato estremamente raro sia per il livello di accelerazione sia per il profilo di velocità, in cui arriva al 14%. In quasi tutti i casi l'uso di accelerogrammi artificiali porta a risultati prudentziali. Va ancora detto che i valori assoluti dell'amplificazione sono a loro volta più bassi del caso precedente per effetto della maggiore non linearità

Le differenze ottenute nelle tre fasi delle analisi vanno considerate nell'ambito delle incertezze insite nelle analisi di amplificazioni sismiche locali.

Nella figura 7 sono diagrammati i fattori di amplificazione FN risultanti dalle analisi effettuate per  $a_g=0.26g$  in tutti gli 8 casi, 4 nella prima fase e 4 nella seconda. Sono paragonati i valori medi con quelli delle analisi con accelerogrammi artificiali. E' evidente che le differenze tra i valori medi e quelli da accelerogrammi artificiali sono piccole rispetto a quelle tra i singoli risultati. Inoltre, è da considerare le incertezze sul moto di riferimento per le analisi. Infatti, come anche sottolineato nella normativa, non sono sempre disponibili informazioni dettagliate sui meccanismi di sorgente nonché sulla magnitudo e la distanza determinanti lo spettro di sito nell'intervallo di periodi di interesse.

Vanno prese in considerazione ancora, ed essenzialmente, le incertezze nelle caratteristiche meccaniche e geometriche dei terreni nel singolo sito: la profondità del bedrock, il profilo di velocità e le

We can see that going from constant profile to the maximum gradient the difference decreases from 9.5 to 1.34% but the absolute difference remains below 0.13. The FN factors in the case of artificial accelerograms are always the highest.

### Third phase

We have fictitiously changed the level of peak acceleration from 0.26g to 0.4g, applying a multiplication factor to the input used in the second phase, in order to highlight the effect of nonlinearity. We considered only the configurations of the second stage because for those we got the major differences between the results. In table III the calculated values of attenuation FN for both the mean of natural accelerograms and the only one artificial are summarized.

As can be seen, even in this case, the difference is less than 10% excluded in the case, which must be considered extremely rare for both the level of acceleration and the velocity profile, in which 14% is reached. In almost all cases the use of artificial accelerograms leads to conservative results. It should also be said that the absolute values of the amplification are also lower than the previous phase due to higher non-linearity

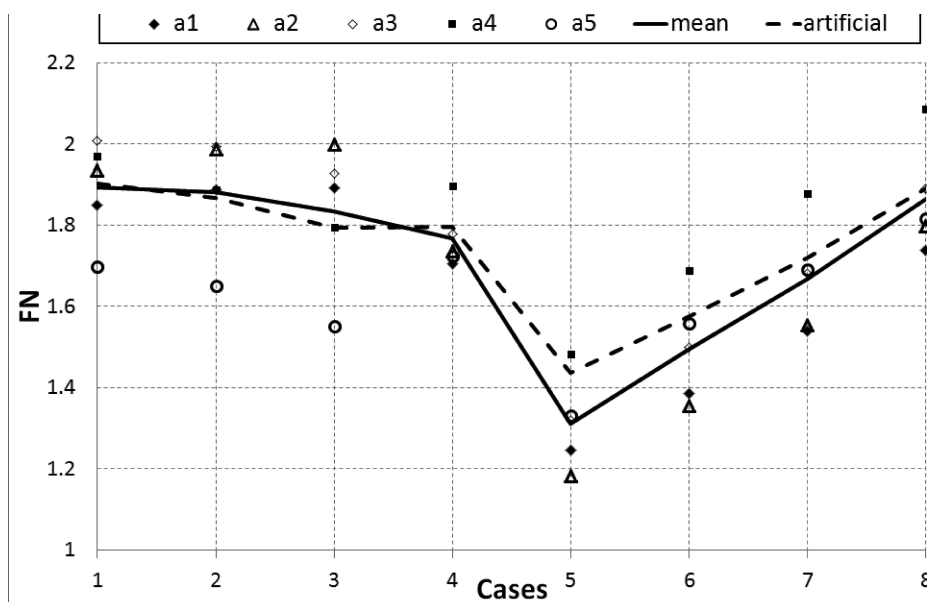
The differences obtained in the three phases of analysis should be considered in the context of the uncertainties inherent in the analysis of local seismic amplifications. In figure 7 the amplification factors are plotted. It is the result of the FN values in the analyses for  $a_g = 0.26g$  in all 8 cases, 4 in the first phase and 4 in the second. The mean values are compared with those of the analysis with artificial accelerograms. It is clear that the differences between the mean values and those of artificial accelerograms are small compared to those among the individual results.

Moreover, one should consider the uncertainties on the reference motions. In fact, as pointed out in the national seismic code, detailed information are not always available on seismic source mechanisms and the magnitude and distance that are determinant for the response spectrum definition in the range of periods of interest.

Consideration should be given more, and essentially, on uncertainties in the mechanical and geometrical characteristics of the soils in each site, i.e. the depth of the bedrock, the velocity profile



Fig. 7 - Confronto tra i risultati per  $ag=0.26g$  per tutti i casi esaminati nella prima e seconda fase (1,2,3,4 riguardano la prima e 5,6,7,8 la seconda fase)  
 - Comparison between the results for  $ag = 0.26g$  for all the cases examined in the first and second phase, (1,2,3,4 concern the first and 5,6,7,8 the second phase)



curve di decadimento, che sono sicuramente più grandi di quelle evidenziate dai confronti effettuati in questo rapporto.

### EFFETTO DEL METODO DI GENERAZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI ARTIFICIALI

Si è cercato di indagare sull'influenza del metodo di generazione di accelerogrammi artificiali a partire da uno spettro di risposta. Oltre a quello usato (SILVA 1987) implementato nel codice numerico MODTH, sono state prese in considerazione due altri metodi: quello del codice SIMQKE (GASPERINI & VANMARKE, 1976) e DECO messo a punto dagli autori. Il primo ricava per iterazione dallo spettro di risposta una densità di potenza nell'ipotesi che l'evento sismico faccia parte di un processo stocastico stazionario. Si definisce quindi la storia temporale come somma di funzioni sinusoidali con fase random e l'ampiezza di ognuna è modificata, mediante iterazione in modo da essere compatibile con la densità di potenza e quindi con lo spettro di risposta, target, assegnato. Il secondo parte direttamente da una storia temporale formata da una somma di funzioni sinusoidali con fase random e ne modifica l'ampiezza iterativamente finché il suo spettro di risposta non sia sufficientemente coincidente con il target. La differenza tra i due metodi e quello MODTH è che quest'ultimo non impone delle fasi random, ma conserva la distribuzione delle fasi di un accelerogramma registrato. Quest'ultimo deve essere compatibile con la sismicità del sito e pertanto deve essere scelto, tra gli accelerogrammi registrati, con gli stessi criteri usati dalle linee guida regionali.

Nella figura 8 sono mostrati i tre accelerogrammi generati con i tre metodi descritti e compatibili con lo spettro medio degli accelerogrammi naturali di Cittareale:  $ag=0.26g$ . Come già accennato quello generato con MODTH ed utilizzato nelle analisi precedenti ha l'aspetto più prossimo ad un accelerogramma registrato.

and the decay curves, which are certainly larger than differences described in this report.

### EFFECT OF THE GENERATION METHOD OF ARTIFICIAL ACCELEROGRAMS

An attempt was made to investigate the influence of the method of generating artificial accelerograms from a response spectrum. In addition to the one used (SILVA, 1987) implemented in the numerical code MODTH, were taken into account two other methods: the code SIMQKE (GASPERINI & VANMARKE, 1976) and DECO developed by the authors. The first one obtains, by iteration, from the response spectrum a power density assuming that the seismic event is part of a stationary stochastic process. The time history is then constructed as a sum of sinusoidal functions with random phase and amplitude of each sinusoid is modified by iteration in order to be compatible with the power density and therefore with the assigned response spectrum. The second one directly generates a time history as a sum of sinusoidal functions with random phase and amplitude that is changed iteratively until the related response spectrum is sufficiently coincident with the target one. The difference between the last two methods and MODTH method is that the latter does not impose a random phase, but preserves the distribution of the phases of a recorded time history. In this way it is closer to a natural accelerogram. In fact, it must be compatible with the seismicity of the site, that means that it must be chosen from among the recorded accelerograms with the same criteria used by the regional guidelines. Figure 8 shows three accelerograms generated by the three methods described. They are compatible with the average spectrum of natural accelerograms Cittareale:  $PGA = 0.26g$ . As already mentioned the MODTH generated and used in previous analysis looks closer to a recorded accelerogram.

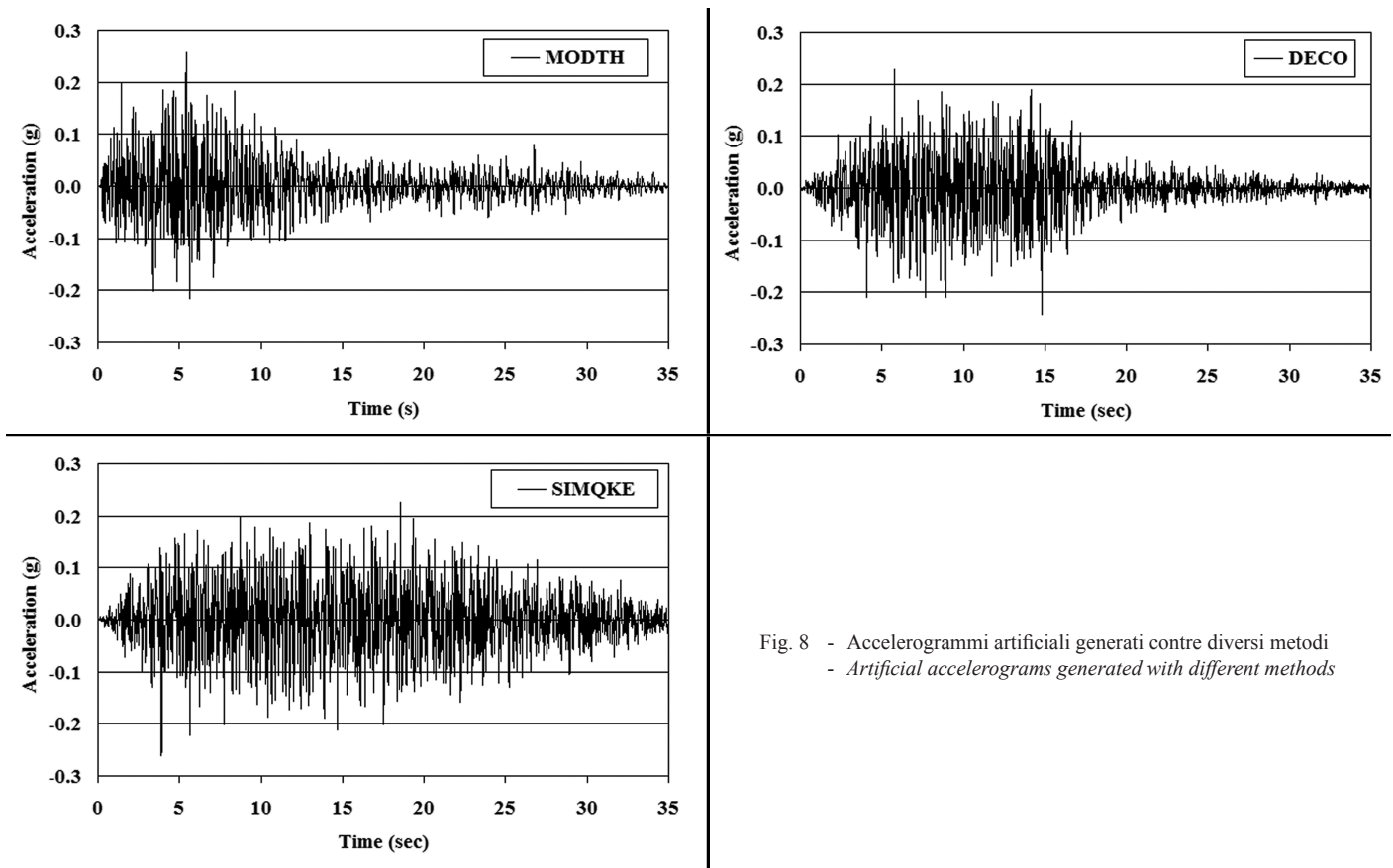


Fig. 8 - Accelerogrammi artificiali generati contro diversi metodi  
 - Artificial accelerograms generated with different methods

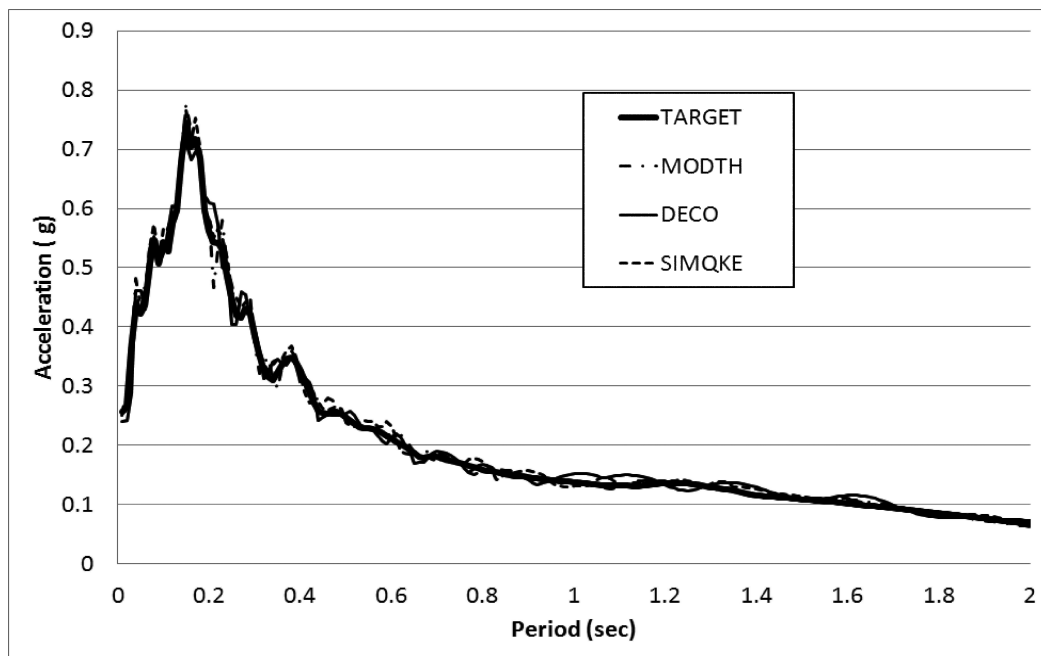


Fig. 9 - Spettri degli accelerogrammi a confronto  
 - Spectra of artificial accelerograms compared with the target spectrum

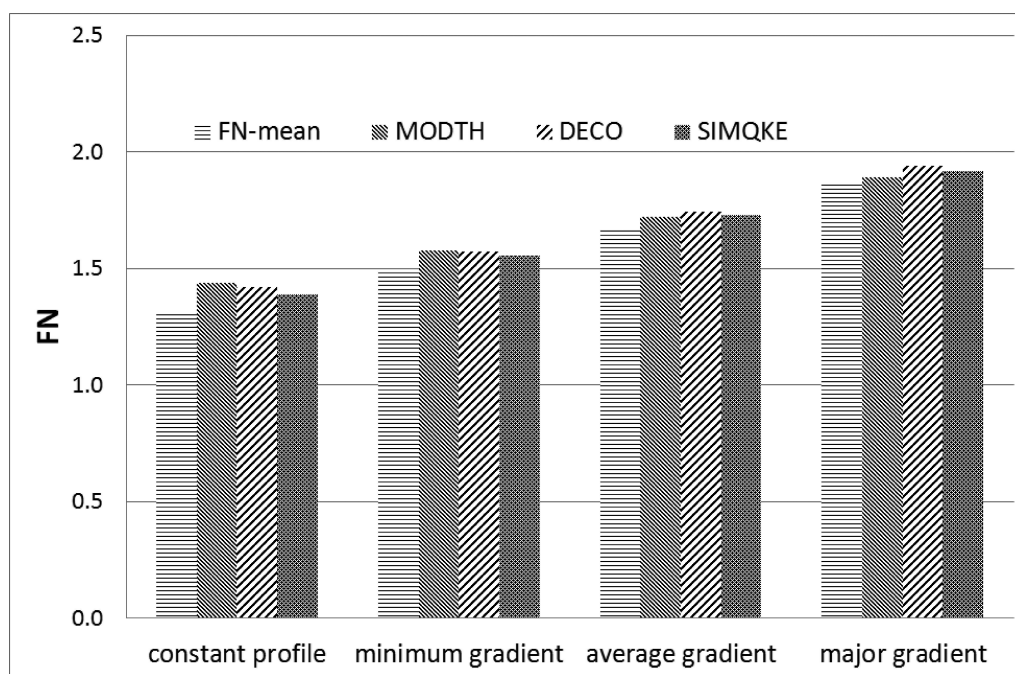


Fig. 10 - Confronto dei valori dei fattori di amplificazione  
- Comparison of the values of amplification factors

Come è mostrato nella figura 9, gli spettri di risposta sono prossimi, a meno di insignificanti differenze dallo spettro target. Le analisi della fase 2, cioè variando solo il profilo di velocità, sono state rifatte con i nuovi accelerogrammi artificiali. E' stata rianalizzata solo la fase 2 perché è quella che ha mostrato maggiori differenze tra naturali ed artificiale. Nella figura 10 sono sintetizzati i risultati nella forma di fattori di amplificazione. Come si vede non esiste una differenza sensibile tra i risultati.

## CONCLUSIONI

Sono state fatte delle analisi di amplificazione sismica locale per il calcolo dei fattori di amplificazione di una eventuale microzonazione sismica con lo scopo di indagare sulla differenza tra l'utilizzo di più accelerogrammi naturali oppure di uno solo artificiale che siano compatibili con lo stesso spettro di risposta di riferimento. L'indagine ha preso in considerazione situazioni plausibili sia per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche e geometriche dei terreni sia per i livelli di eccitazione sismica, escluso il caso fittizio e dimostrativo della terza fase, ma non è stato preso in considerazione il fenomeno dell'aumento della pressione interstiziale. Dai risultati risulta che la differenza dei risultati, cioè tra il valor medio dei risultati con gli accelerogrammi naturali e quello artificiale, è estremamente ridotto rispetto sia alle variazioni del moto di input sia alle incertezze insite nella caratterizzazione delle proprietà meccaniche e geometriche nella singola area, per quanto definita omogenea. Quanto detto è ancora vero anche nei casi di forti discontinuità tra gli strati di terreno dove la non linearità raggiunge il valore massimo.

As shown in Figure 9, the response spectra of artificial accelerograms are close, less than insignificant differences, to the target spectrum. The analyses of phase 2, that is, changing only the velocity profile, have been redone with new artificial accelerograms. Only phase 2 was retested because it has shown major differences between results of natural and artificial input. Figure 10 summarizes the results in the form of amplification factors. As you can see there is no appreciable difference.

## CONCLUDING REMARKS

Local seismic amplification analysis have been made to calculate the amplification factors of a possible seismic microzonation with the aim to investigate the difference between the use of multiple natural accelerograms and the artificial one that is compatible with the same reference response spectrum. The survey took into account plausible situations both in the mechanical and geometrical characteristics of the soil and levels of seismic excitation, except for nonlinear effects pore pressure phenomena. It is shown that the difference in the results, that is, between the mean of the results of several natural accelerograms and the only artificial, is extremely small compared to both variations of the input motion and the uncertainties inherent in the characterization of mechanical and geometrical properties in a single area, also if defined homogeneous. This is also true in the case of strong discontinuities between the soil layers, where the non-linearity reach its maximum value.

**OPERE CITATE / REFERENCES**

- Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", (10 gennaio 2007).
- Bollettino Ufficiale della Regione Lazio n.48 del 28 dicembre 2010
- CIRCOLARE 2 FEBBRAIO 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- GASPERINI D.A. & VANMARKE E.H. (1976) - *Simulated earthquake motion compatible with prescribed response spectra*. M.I.T. Evaluation of Seismic Safety of Buildings, Report No. 2.
- GRUPPO DI LAVORO MS (2008) - *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*, 3 vol. e 1 DVD.
- IDRISS I.M. & SUN J.I. (1992) - *SHAKE91 - a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soils deposits*. University of California, Davis.
- NTC-08 (2008) - *Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 14 gennaio 2008, Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*.
- REGIONE LOMBARDIA, *Territorio e Urbanistica, Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio, in attuazione dell'art. 57 della l.r. 11 marzo 2005, N. 12*
- SILVA W.J. (1987) - *WES Rascal code for synthesizing earthquake ground motions*. Miscellaneous Paper S-73-1, US Army Engineer WES.

*Received February 2012 - Accepted October 2012*