

## CONSIDERAZIONI BASATE SULLE REGISTRAZIONI DEL TERREMOTO DI HONSHU (GIAPPONE) DELL'11 MARZO 2011

### INSIGHTS INTO THE GROUND MOTION RECORDS OF THE HONSHU (JAPAN) EARTHQUAKE OF 11 MARCH 2011

LUCA LENTI<sup>(\*)</sup>, SALVATORE MARTINO<sup>(\*\*)</sup>, ANTONELLA PACIELLO<sup>(\*\*\*)</sup>,  
ALBERTO PRESTININZI<sup>(\*\*)</sup> & ROBERTO W. ROMEO<sup>(\*\*\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> IFSTTAR - University Paris Est - Paris, France

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza University of Rome - CERI Research Center and Department of Earth Sciences - Rome, Italy

<sup>(\*\*\*)</sup> ENEA - Research Center Casaccia - Rome, Italy

<sup>(\*\*\*\*)</sup> University of Urbino "Carlo Bo" - Urbino, Italy

#### ABSTRACT

Questa nota segue il report preliminare inserito on-line in data 25 marzo 2011 sul sito di questa Rivista. Si tratta quindi di una evoluzione del resoconto preliminare basato su elaborazioni di alcune registrazioni accelerometriche del terremoto di Honshu (Giappone) del 11 marzo 2011, rese disponibili dalle reti giapponesi KI-NET e KIK-NET nonché ottenute da una rete accelerometrica gestita dal CERI (Sapienza, Università di Roma) in Appennino Centrale.

Alcune peculiarità di tali registrazioni, in termini di caratteristiche cinematiche e spettrali, sono poste in luce dalla loro analisi nei domini del tempo e delle frequenze e la possibile esistenza di effetti amplificativi, dovuti alla geologia locale, risulta da un'analisi preliminare di tutte le registrazioni disponibili dalla rete KIK-NET in termini di rapporti tra scuotimento locale e scuotimento su *bedrock*. Il confronto tra queste distribuzioni di effetti e la localizzazione delle principali centrali nucleari dell'isola di Honshu evidenzia l'assenza di amplificazioni locali particolarmente significative in tali siti così come, d'altro canto, gli spettri di risposta del moto sismico non risultano superare gli spettri di progetto delle centrali localizzate nell'area costiera orientale di Honshu.

Infine, un'analisi preliminare del valore dei danni causati dal sisma di Honshu rispetto ai precedenti eventi sismici che hanno colpito il Giappone e l'Italia durante l'ultimo secolo mette in evidenza, per entrambi gli Stati, una significativa riduzione nel secondo dopoguerra del rapporto tra vittime ed abitanti esposti, con valori che non arrivano all'1%. Ciononostante, si deve sottolineare che gli ultimi due eventi sismici considerati (terremoto de L'Aquila del 2009 e terremoto di Honshu del 2011) hanno prodotto un rapporto tra vittime ed abitanti esposti pressoché uguale a fronte di una differenza di circa tre ordini di magnitudo.

**PAROLE CHIAVE:** terremoto, Honshu, scuotimento sismico, amplificazione sismica locale, danni

#### INTRODUZIONE

Il terremoto di Honshu (Giappone-Mw 9.0) è avvenuto l'11 marzo del 2011 alle 05:46:24 UTC a circa 168 km ad est da Sendai (coordinate epicentrali 38.424°N, 142.836°E, profondità ipocentrale 24 km) (Fig. 1).

#### ABSTRACT

This paper is a follow-up of a preliminary report on the same subject, which was posted on the website of this Journal on 25 March 2011. The report investigated the ground motion records of the Honshu earthquake of 11 March 2011, made available by the Japanese accelerometric networks KIK-NET and K-NET and by an Italian seismometric network, operated by the CERI Research Centre (Sapienza University of Rome) and located in the central Apennines.

The paper highlights some kinematic and spectral features identified in the above records after analysing them in the time and frequency domains. Possible amplification effects due to the local geological setting also result from a preliminary analysis of the ratios of local ground motion to bedrock motion. The comparison of the distribution of these effects with the location of the main nuclear power plants (NPPs) of the Honshu island shows that: i) local seismic amplification was not particularly significant in these sites, and ii) the response spectra of the Honshu earthquake did not exceed the design spectra of the NPPs located along the eastern coast of Honshu.

Finally, a preliminary analysis of the damages caused by the Honshu earthquake vs. previous seismic events which hit Japan and Italy in the last century indicates that the ratio of casualties to exposed inhabitants substantially dropped after the second world war (below 1% in both countries). Nevertheless, it is worth stressing that the latest two seismic events considered here (L'Aquila earthquake in 2009 and Honshu earthquake in 2011) had an almost equal ratio of casualties to exposed inhabitants, in spite of a difference of about 3 orders of magnitude.

**KEY WORDS:** earthquake, Honshu, seismic ground motion, local seismic amplification, damages

#### INTRODUCTION

The Honshu (Japan) earthquake (Mw 9.0) occurred about 168 km east of Sendai (epicentral co-ordinates 38.424°N, 142.836°E, hypocentral depth about 24 km) on 11 March 2011 at 05:46:24 UTC (Fig. 1).

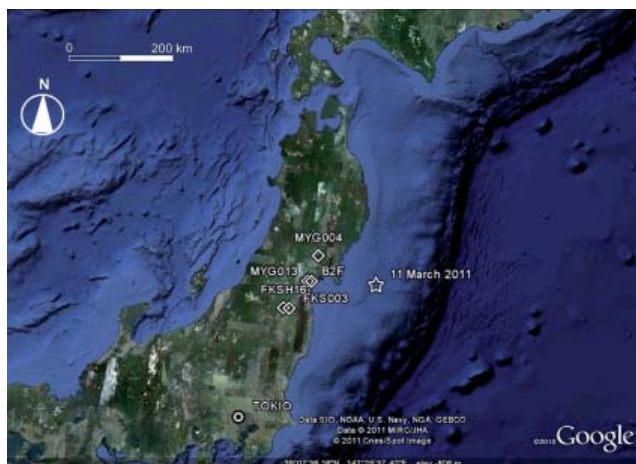


Fig. 1 - Ubicazione su una Google map delle stazioni delle reti K-NET e KIK-NET considerate in questo studio; viene anche riportato l'epicentro del terremoto di Honshu dell'11 marzo 2011

- Location of the K-NET and KIK-NET networks (considered in this study) on a Google map and epicentre of the Honshu earthquake of 11 March 2011

La scossa principale ha prodotto una disastrosa onda di tsunami che ha raggiunto la costa orientale del Giappone in meno di 15min (fonte NOAA); l'onda è stata caratterizzata da un'altezza massima di circa 10 m e si è addentrata nell'entroterra fino a circa 5 km (Fig. 2).

Centinaia di repliche, circa 20 delle quali con  $M_w > 6$ , hanno seguito la scossa principale (fonte USGS).

### ANALISI DI ALCUNE REGISTRAZIONI ACCELEROMETRICHE

Tra le registrazioni disponibili degli scuotimenti del terremoto di Honshu dell'11 marzo 2011 (fonte reti sismometriche giapponesi K-NET e KIK-NET) alcune sono state processate con il codice SAC (Seismic Analysis Code) per ricavare le storie temporali in velocità e spostamento. Inoltre, sono state ottenute le trasformate di Fourier (FFTs), gli spettri di risposta al 5% di smorzamento nell'intervallo 0-20 s e le intensità di Arias sull'intera durata dei segnali.

I risultati dell'analisi mettono in luce una durata significativamente elevata (circa 2 min), un elevato contenuto energetico, pari ad alcuni m/s di intensità di Arias, corrispondente ad un potenziale distruttivo molto alto (velocità assoluta cumulata - CAV - pari ad alcuni g-s, mentre il valore di soglia per il danneggiamento è di 0.16 g-s).

Come esempio sono state analizzate le forme d'onda registrate a Sendai dalla stazione B2F del *Building Research Institute* al piano terra di un edificio ad uso ufficio che è localizzato a 150 km ad ovest dell'epicentro (Fig. 3). I risultati dell'analisi mostrano elevati valori di velocità e un contenuto spettrale significativo in un ampio intervallo di periodi (0.5-10 sec). Tra gli altri parametri: PGV 35 cm/s; PGD 120 cm; Intensità di Arias 2.9 m/s; CAV 3.9 g-s; *bracketed du-*

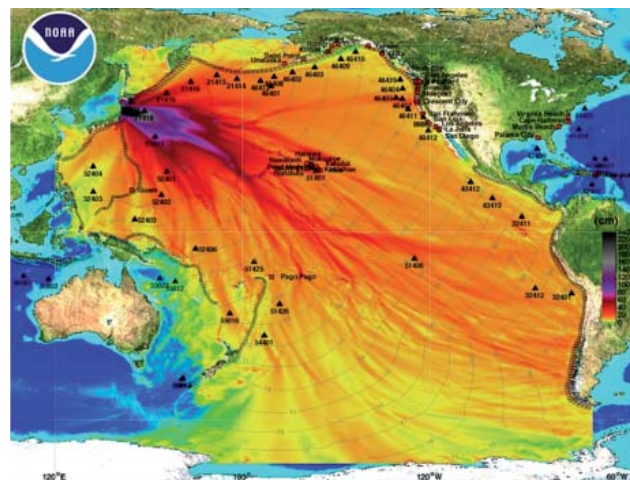


Fig. 2 - Propagazione dell'onda di tsunami nell'oceano Pacifico (fonte NOAA)

- Tsunami wave propagation within the Pacific Ocean (NOAA source)

The mainshock induced a catastrophic tsunami wave, which reached the eastern Japanese coast in less than 15 min (source: NOAA). The wave had a maximum height of about 10 m and penetrated as far as 5 km inland (Fig. 2).

Hundreds of aftershocks, about 20 of which with a magnitude greater than  $M_w 6$ , followed the mainshock (source: USGS).

### ANALYSIS OF SOME ACCELEROMETRIC RECORDS

Some of the ground motion records available for the Honshu earthquake of 11 March 2011 (source: Japanese seismometric networks K-NET and KIK-NET) were processed by means of SAC (Seismic Analysis Code) in order to derive velocigrams and displacement time histories. Moreover, Fast Fourier Transforms (FFTs), 5% damped response spectra in the 0-20 s range and Arias intensities were computed over the entire duration of the signals.

The results of the processing showed a significantly long duration (about 2 min) and a high energy content (some m/s in terms of Arias intensity), corresponding to an extremely high destructive potential (cumulated absolute velocity - CAV - of some g-s vs. a damage threshold as low as 0.16 g-s).

As an example, the waveforms recorded on the ground floor of an office building in Sendai by station B2F of the *Building Research Institute*, 150 km west of the epicentre (Fig. 3), were analysed. The waveforms show high velocity values and a significant spectral content in a wide interval of periods (between 0.5 and 10 s). Other parameters are as follows: PGV 35 cm/s; PGD 120 cm; AI 2.9 m/s; CAV 3.9 g-s; bracketed duration 122 s. The waveforms recorded at Fukushima (station FKSH16\_2, Fig. 4) have a very similar pattern. In this case, the PGD reached 2 m (horizontal component) and the PGV was of up to 24 cm/s.

ration 122 s. Caratteristiche molto simili sono mostrate dalle forme d'onda registrate a Fukushima (stazione FKSH16\_2) e riportate in Fig. 4. In questo caso il PGD ha raggiunto 2 m (componente orizzontale) e il PGV fino a 24 cm/s.

**PRIME CONSIDERAZIONI IN MERITO A POSSIBILI EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE E SULL'INCIDENTE DELLA CENTRALE NUCLEARE DI FUKUSHIMA**

Possibili effetti di amplificazione sismica locale vengono messi in evidenza dal confronto tra le receiver function (HVSr vs. frequenza - FIELD & JACOB, 1995) ottenuti per le stazioni MYG013 (vicino Sendai), FKS003 (vicino Fukushima) e MYG004 (vicino Tsukidate) e quelle ottenute per le stazioni B2F e FKSH16\_2 le cui receiver fun-

Possible local amplification effects are identified by comparing the receiver functions (HVSr vs. frequency - FIELD & JACOB, 1995) computed for stations MYG013 (close to Sendai), FKS003 (close to Fukushima) and MYG004 (close to Tsukidate) with those obtained for the above-mentioned stations B2F and FKSH16\_2, whose receiver functions do not point to major amplification effects (Fig. 5).

**PRELIMINARY CONSIDERATIONS ON LOCAL SEISMIC AMPLIFICATION AND THE FUKUSHIMA NUCLEAR INCIDENT**

Based on all the seismometric records available from the Japanese networks K-NET and KIK-NET, a preliminary PGA attenuation law under free-field conditions was derived (Fig. 6), with an uncertainty of 100% and an attenuation coefficient of roughly 2.5 vs. a typical value of about 1.0.

Only few records yielded PGA values exceeding 1 g. However,

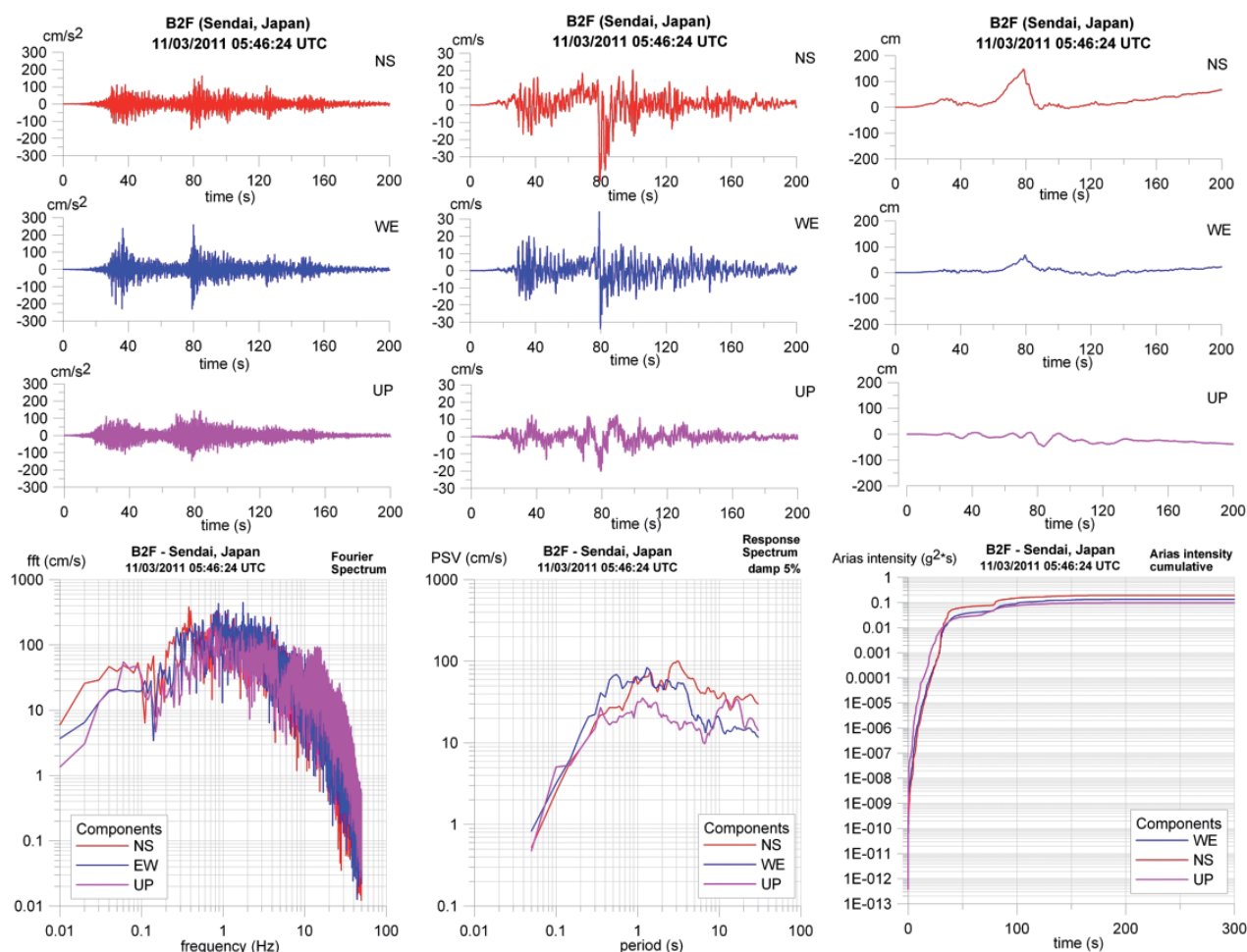


Fig. 3 - Analisi delle forme d'onda della registrazione accelerometrica disponibile per la stazione BF2 di Sendai  
 - Analysis of the waveforms of the accelerometric record available for station BF2 in Sendai

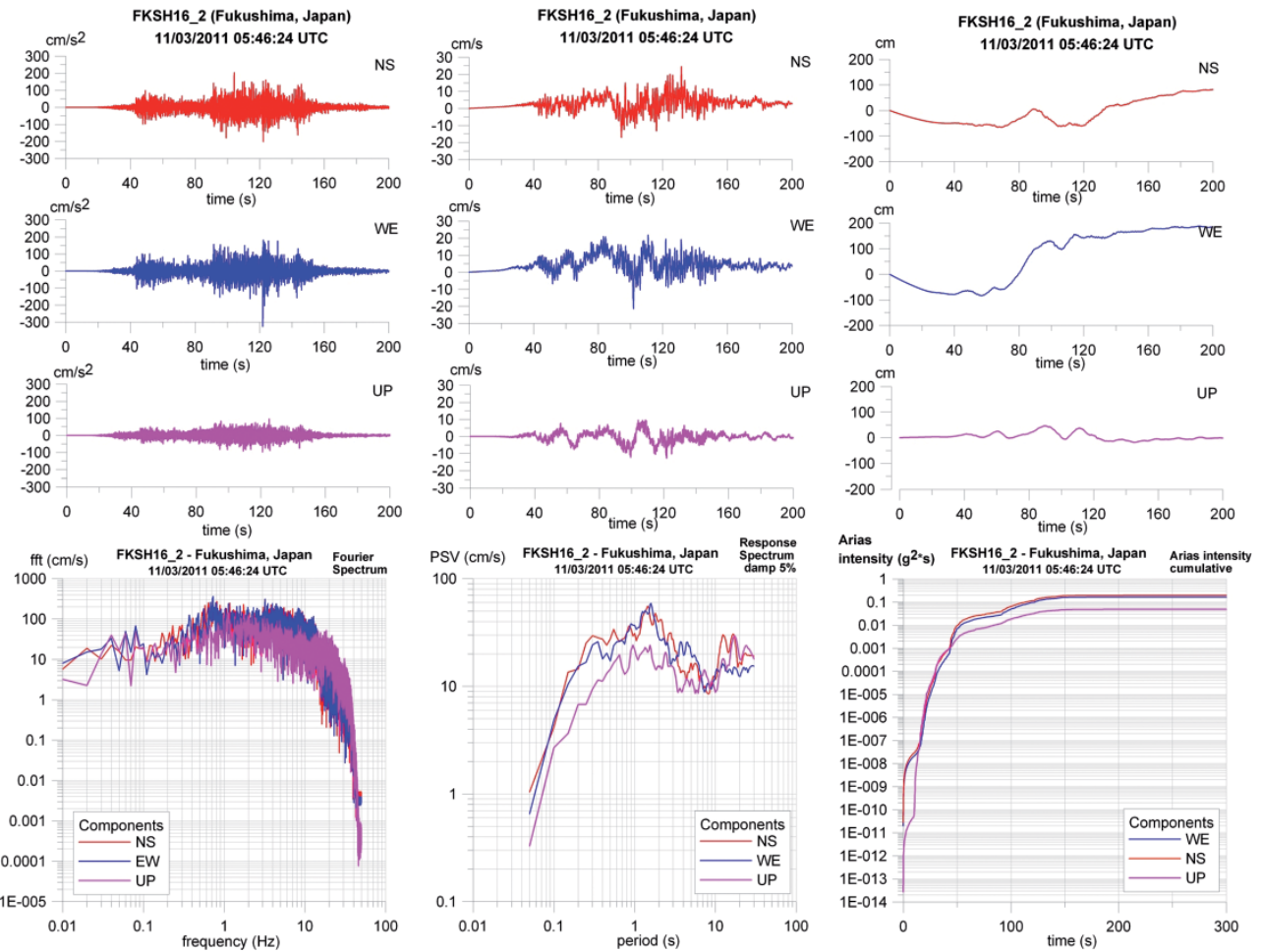


Fig. 4 - Analisi delle forme d'onda della registrazione accelerometrica disponibile per la stazione FKSH16\_2 di Fukushima (stazione KIK-NET)  
 - Analysis of the waveforms of the accelerometric record available for the FKSH16\_2 Fukushima KIK-NET station

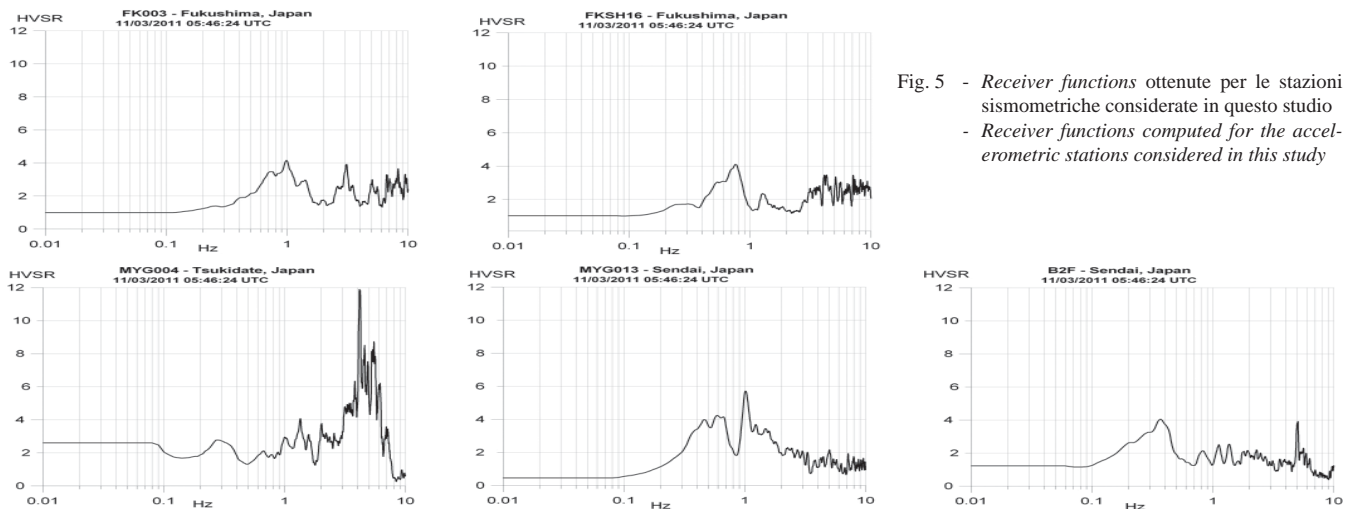


Fig. 5 - Receiver functions ottenute per le stazioni sismometriche considerate in questo studio  
 - Receiver functions computed for the accelerometric stations considered in this study



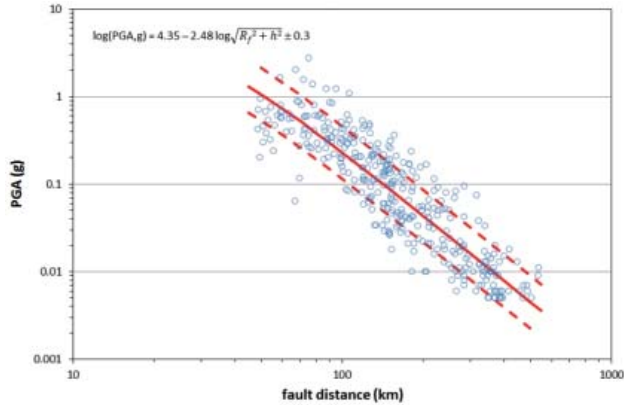


Fig. 6 - Legge di attenuazione in funzione della distanza dalla faglia Joney-Boore in condizioni di *free field*, ottenuta in base alle registrazioni delle reti giapponesi K-NET e KIK-NET  
 - PGA attenuation law vs. Joyner-Boore fault distance under free-field conditions, obtained from the records of the Japanese networks K-NET and KIK-NET

ction non indicano significativi effetti di amplificazione (Fig. 5).

Sulla base di tutti i dati disponibili dalle registrazioni sismometriche delle reti giapponesi K-NET e KIK-NET, è stata ricavata una legge di attenuazione preliminare del PGA ottenuta per le condizioni di *free field* (Fig. 6) con un'incertezza del 100% ed un coefficiente di attenuazione pari a circa 2.5, che risulta significativo se confrontato con il valore tipico prossimo ad 1.

Solo poche registrazioni hanno restituito valori di PGA superiori ad 1g; tuttavia, tutti questi valori sono compresi tra la media e la *standard deviation* della legge di attenuazione ricavata a dimostrazione del fatto che tali valori risultano legati a condizioni di sito molto specifiche piuttosto che a condizioni legate alle caratteristiche dello scuotimento rispetto all'area sorgente. Inoltre, è bene notare che la legge di attenuazione disponibile in Giappone ed ottenuta sulla base della sismicità, prevede valori di PGA ben più elevati di quelli registrati a parità di magnitudo e distanza (S1 & MIDORIKAWA, 1999).

Come effetto dello scuotimento sismico e del conseguente tsunami, 4 delle 54 centrali nucleari giapponesi si sono spente riducendo in modo drastico l'approvvigionamento energetico nelle prefetture di Fukushima e Miyagi. Il campo di scuotimento ricavato dalle registrazioni in *free field* è riportato in Fig. 7, nonostante non sia stato possibile considerare ed includere nei calcoli le registrazioni ottenute alle singole centrali nucleari.

I valori di accelerazione sismica ottenuti lungo la costa sono stati approssimativamente di circa 0.5 g, ovvero non così elevati rispetto ai valori di accelerazione di progetto utilizzati per la centrale nucleare di Fukushima-Daiichi (Tab. 1, dati TEPCO – Tokyo Electric Power Company). Il più elevato dei valori di accelerazione sismica in eccesso rispetto al previsto è stato registrato al reattore 2 anche se tale valore era ampiamente compensato dai fattori cautelativi adottati nella definizione dell'accelerazione di progetto. Infatti, a seguito del

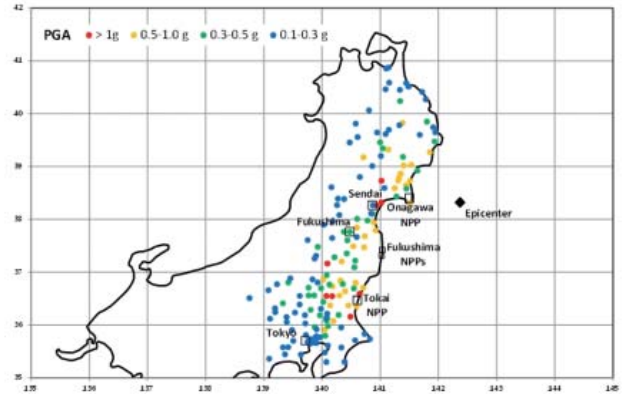


Fig. 7 - Campo di scuotimento derivato dalle registrazioni in condizioni di *free field*  
 - Ground motion field derived from the free-field records

all of these values lie between the average and the standard deviation of the attenuation law, suggesting that they are more related to very local and site-specific geological conditions than to the characteristics of the strong ground motion radiated from the source. Moreover, it is worth noting that the attenuation law available in Japan and derived from Japanese seismicity predicts PGA values by far higher than the actually recorded ones for the same magnitude-distance pairs (S1 & MIDORIKAWA, 1999).

As an effect of the strong ground motion and the consequent tsunami, 4 out of the 54 Japanese nuclear power plants (NPPs) were automatically shut down, sharply cutting power supply to the Fukushima and Miyagi prefectures. Fig. 7 displays the ground motion field derived from the free-field records of the Honshu earthquake, although it was not possible to include the data recorded at the individual NPPs in the computations.

Ground motion values along the coastline were approximately around 0.5 g, not so higher than the design acceleration values of the Fukushima NPP (Tab. 1, data from TEPCO - Tokyo Electric Power Company). The maximum exceedance was observed at reactor 2, although this value was largely offset by the safety margins used to define the design acceleration. Indeed, after the Niigata-Chuetsu-Oki (NCO) earthquake of 16 July 2007 (Mw 6.8), which struck the Kashiwazaki-Kariwa NPP (the largest in the world), TEPCO revised the safety margins of the Fukushima-Daiichi NPP, taking into account the results shown in Fig. 8; in the figure, the black solid line is the design spectrum of the Fukushima-Daiichi NPP and the red dashed line is the response spectrum recorded at the foundation basemat of the Kashiwazaki-Kariwa NPP. At the fundamental frequencies of the main structural and functional systems of the Fukushima-Daiichi NPP, the design accelerations do not significantly depart from those observed at the Kashiwazaki-Kariwa NPP, which had no significant damages during the 2007 NCO earthquake. This infers that scrambling operations at the Fukushima-Daiichi NPP were successfully conducted and

Reactor	PGA-max	PGA-design	$\Delta$ -PGA(%)	PGA-scrum
1	460	487	-6	135
2	550	438	+26	
3	507	441	+15	
4	319	445	-28	
5	548	452	+21	
6	444	448	-1	

Tab. 1 - Massima accelerazione di picco (PGA-max) registrata alla fondazione della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi a confronto con le accelerazioni di progetto (PGA-design) e soglia di accelerazione prevista per lo spegnimento della centrale nucleare (PGA-scrum). I valori di PGA sono in gal (cm/s<sup>2</sup>)

- Maximum observed acceleration (PGA-max) at the foundation basemat of the Fukushima-Daiichi NPP vs. design accelerations (PGA-design) and acceleration threshold for NPP scramming (PGA-scrum). The values of the PGAs are expressed in gal (cm/s<sup>2</sup>)

terremoto di Niigata-Chuetsu-Oki del 16 Luglio 2007 (Mw 6.8) che ha colpito la centrale nucleare di Kashiwazaki-Kariwa (a tutt'oggi il più grande impianto nucleare al mondo), la TEPCO ha ricontrollato i valori di sicurezza della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi tenuto conto dei risultati riportati in Fig. 8 dove la linea nera rappresenta lo spettro di progetto della centrale di Fukushima-Daiichi mentre la linea rossa tratteggiata rappresenta lo spettro di risposta registrato sul piano fondale della centrale nucleare di Kashiwazaki-Kariwa. Si può osservare come alle frequenze fondamentali dei principali elementi strutturali e funzionali della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi le accelerazioni di progetto non sono così differenti da quelle registrate alla centrale nucleare di Kashiwazaki-Kariwa, che non ha mostrato danni significativi durante il succitato sisma di Niigata-Chuetsu-Oki del 2007. Pertanto è possibile ritenere che le operazioni di spegnimento della centrale siano state correttamente condotte e che i danni subiti al reattore siano da attribuirsi esclusivamente agli effetti dovuti all'onda di tsunami.

A questo proposito, lo schema di Fig. 9 (da TEPCO) mostra cosa è accaduto alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi per effetto dell'allagamento dovuto allo tsunami. La successione di eventi può essere descritta come segue: l'altezza della massima onda di tsunami di progetto era di 6 m rispetto al livello del mare come dimostrato dalla dimensione delle opere difensive. L'onda di tsunami effettivamente generata dal sisma è stata di 14 m rispetto all'attuale livello del mare cosicché l'onda di esondazione è stata circa 5 m più elevata rispetto alla sommità degli edifici e delle strutture lato mare contenenti i sistemi di pompaggio dell'acqua di mare che, di conseguenza, sono stati danneggiati tanto da non poter raffreddare i nuclei ed evitarne la parziale fusione. Per completezza di informazione è bene ricordare che un recente studio (SATAKE *et alii*, 2007) aveva identificato almeno tre onde di tsunami giganti che, nel corso degli ultimi 3000 anni avrebbero colpito la prefettura di Miyagi, ultima delle quali nel 869 A.D., e che si sarebbero addentrate nell'entroterra fino a circa 5 km dalla costa.

In merito all'amplificazione sismica locale in corrispondenza dei siti in cui sono localizzate le centrali nucleari di Honshu, possono es-

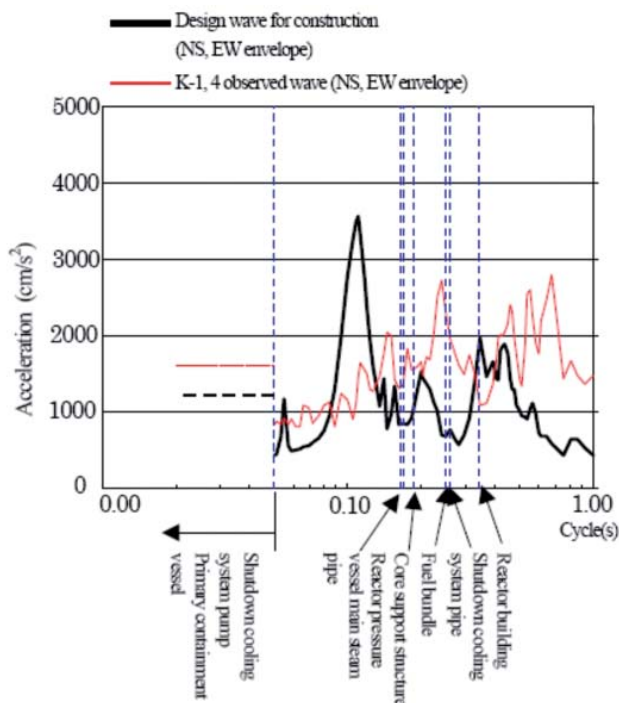


Fig. 8 - Confronto tra gli spettri di risposta in accelerazione al livello del piano delle fondazioni della centrale nucleare di Fukushima-Daiichi (unità n°1) e quella di Kashiwazaki-Kariwa (unità n° 1 e 4) per un coefficiente di smorzamento pari all' 1%

- Comparison between 1% damped response spectra at the foundation basemats of the Fukushima-Daiichi NPP Unit 1 (black) and of the Kashiwazaki-Kariwa NPP Units 1 and 4 (red)

that reactor building failures were caused by the tsunami wave alone.

In this regard, the scheme of Fig. 9 (from TEPCO) shows what may have happened at the Fukushima-Daiichi NPP owing to the tsunami flooding. The sequence of events may be outlined as follows. The maximum design tsunami wave height was 6 m above sea level (as demonstrated by the size of protective structures). The tsunami wave actually generated by the earthquake was 14-m high and the resulting flooding depth was about 5 m higher than the top of the ocean-side buildings and structures, containing seawater pumping systems. These systems failed, triggering the heat accumulation and temperature increase that led to partial core meltdown. For information completeness, a recent study (SATAKE *et alii*, 2007) had identified at least three giant tsunami waves hitting the Miyagi prefecture in the past 3,000 years; the latest one, in 869 AD, penetrated as far as 5 km inland.

With regard to seismic amplification at the sites of the Honshu NPPs, Fig. 10a shows the contour lines of the distribution of amplification values between ground motion and bedrock motion, obtained from the KIK-NET stations alone.

High amplification values were recorded in extremely localised areas, such as those north of the Honshu island. These values, which

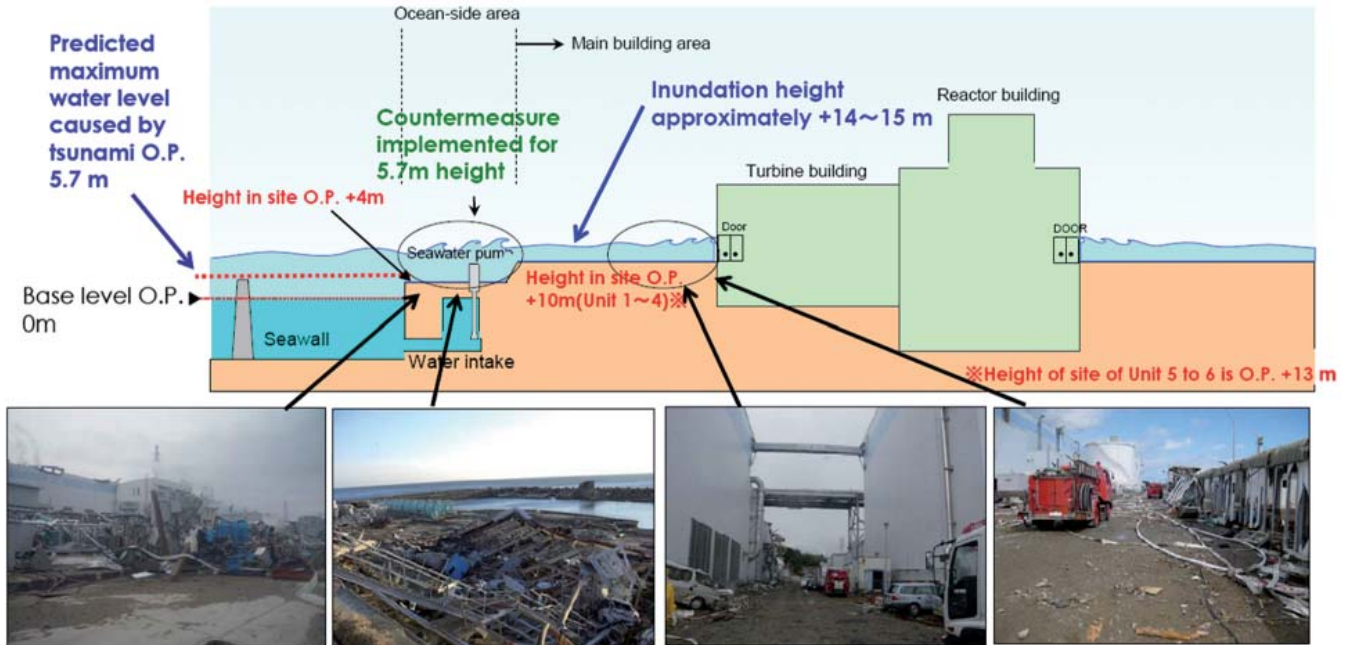


Fig. 9 - Ricostruzione schematica dell'impatto dell'onda di tsunami sulla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi (da TEPCO)  
 - Schematic reconstruction of the tsunami impact on the Fukushima-Daiichi NPP (from TEPCO)

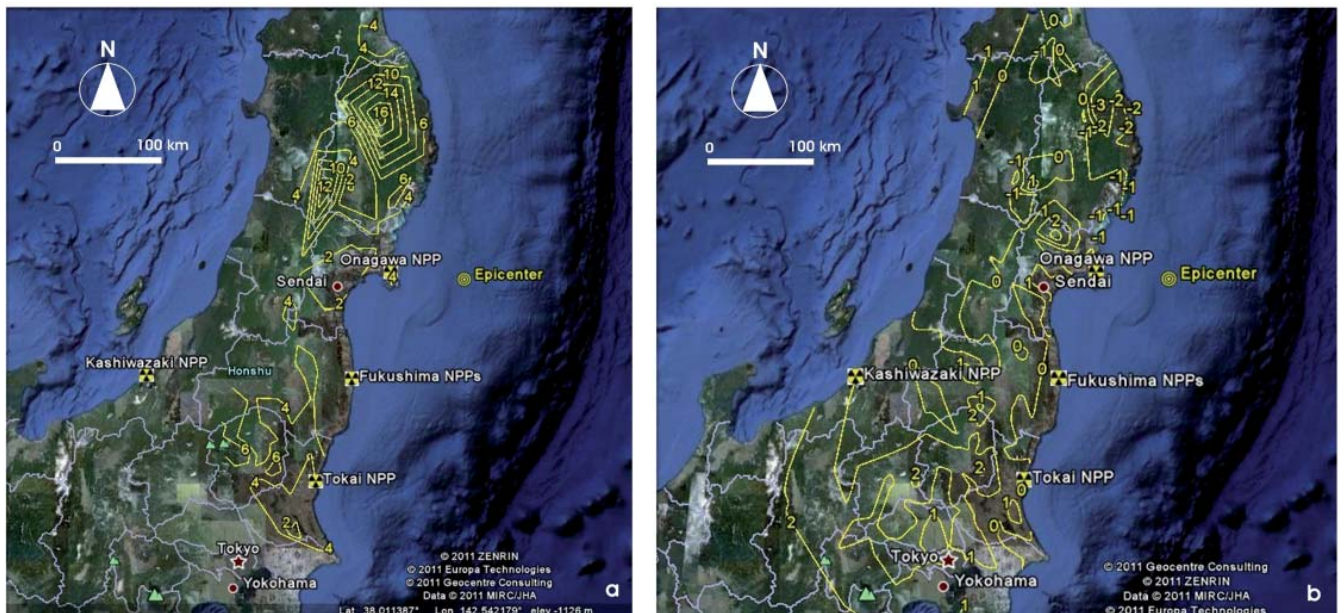


Fig. 10 - a) Isolinee dei valori di amplificazione tra *ground motion* e *bedrock motion*, ricavati dalle sole stazioni della rete KIK-NET; b) isolinee relative ai valori di *standard deviation* dell'accelerazione registrata in *free-field* rispetto ai valori mediani ottenuti dalla legge di attenuazione dei PGA. In entrambe le figure sono anche indicate le localizzazioni delle principali città giapponesi colpite e delle principali centrali nucleari dell'isola di Honshu  
 - a) Contour lines of the amplification values derived from the ratio of ground motion to bedrock motion at the KIK-NET stations only ; b) contour lines of standard deviations of free-field ground motion records vs. median values obtained from the PGA attenuation law. Both figures also show the location of the main Japanese towns hit by the earthquake and of the main NPPs of the Honshu island.



sere considerate le isolinee riportate in Fig. 10a che rappresentano la distribuzione dei valori di amplificazione tra *ground motion* e *bedrock motion*, ricavati dalle sole stazioni della rete KIK-NET.

Amplificazioni significative si registrano in aree molto localizzate, come quelle a nord dell'isola di Honshu, e sono probabilmente dovute a particolari condizioni di sito che potranno essere giustificate solo a valle di una dettagliata analisi delle stratigrafie riferibili alle stazioni degli *array* che, tuttavia, non sono state disponibili per questo primo studio.

In base all'analisi preliminare qui riportata, le centrali nucleari di Tokai, Fukushima e Onagawa ricadono in settori in cui i valori di amplificazione risultano inferiori a 4.

Analoghe considerazioni possono essere tratte sulla base delle isolinee riportate in Fig. 10b che si riferiscono alle *standard deviation* dei valori di accelerazione registrati in *free-field* rispetto ai valori medi che si ottengono elaborando la legge di attenuazione a partire dalle registrazioni accelerometriche ottenute durante il terremoto (Fig. 6). Poiché valori compresi tra -1 e +1 rappresentano il normale *scatter* delle accelerazioni, ai fini di effetti amplificativi risultano significativi solo valori esterni a questo range.

Di conseguenza, i danni risultanti al sistema di raffreddamento della centrale di Fukushima-Daiichi possono essere imputati principalmente allo tsunami piuttosto che allo scuotimento sismico, considerando anche il fatto che il margine di sicurezza di una centrale nucleare generalmente copre un evento più grande di due o più ordini di grandezza rispetto a quello di progetto.

## DERIVAZIONE DI UN SEGNALE SISMICO EQUIVALENTE LEMA\_DES PER LO STRONG-MOTION DI HONSHU

Un segnale equivalente per le componenti orizzontali delle forme d'onda registrate a Sendai (stazione B2F) è stato derivato (Fig. 11) secondo la procedura LEMA\_DES (Levelled-Energy Multifrequential analysis for Dynamic Equivalent Signals) proposta da LENTI & MARTINO (2010). La procedura consiste in un nuovo approccio per derivare segnali dinamici equivalenti multifrequenziali a partire da accelerogrammi naturali. Secondo questo approccio, il segnale equivalente soddisfa i criteri di equivalenza spettrale, energetica e cinematica rispetto ai prototipi naturali.

I segnali LEMA\_DES risultano particolarmente affidabili per applicazioni sperimentali. Queste applicazioni includono modellazioni analogiche di laboratorio alla tavola vibrante e alla centrifuga come anche modellazioni numeriche basate sui codici FDM, FEM o BEM finalizzate all'analisi degli effetti sismoindotti (risposta sismica locale, instabilità gravitative, liquefazione dei terreni sciolti).

## REGISTRAZIONE DEL TERREMOTO DI HONSHU IN APPENNINO CENTRALE

Di seguito viene riportata e analizzata la forma d'onda del terremoto di Honshu del 11 marzo del 2011 registrata in Appennino Centrale;

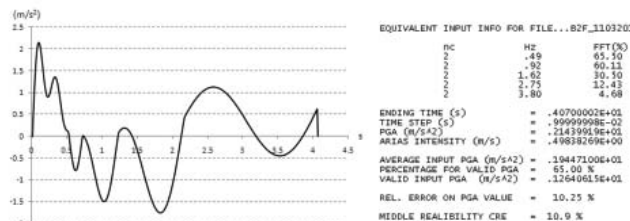


Fig. 11 - Segnale dinamico equivalente LEMA\_DES per l'accelerazione orizzontale registrata alla stazione B2F (il file è scaricabile dal sito del CERI <http://www.ceri.uniroma1.it>)

- LEMA\_DES- derived equivalent signal for the horizontal acceleration recorded at station B2F (the file may be downloaded from CERI's website <http://www.ceri.uniroma1.it>)

are likely to be due to site-specific conditions, will be analysed in detail after the geological data of the stations become available.

Based on the preliminary analysis reported here, the Tokai, Fukushima and Onagawa NPPs are located in sectors whose amplification values are below 4.

Similar considerations may be made by analysing the contour lines of Fig. 10b (standard deviations of free-field ground motion records vs. average values derived from the PGA attenuation law, Fig. 6). As the +1/-1 range expresses the usual scatter of acceleration values, only the values off this range are representative of amplification effects.

## LEMA\_DES DYNAMIC EQUIVALENT SIGNAL DERIVED FROM THE HONSHU STRONG MOTION RECORD

An equivalent signal for the horizontal components of the waveforms recorded at Sendai (station B2F) was also obtained (Fig. 11) by using the LEMA\_DES (Levelled-Energy Multifrequential Analysis for Dynamic Equivalent Signals) procedure proposed by LENTI & MARTINO (2010). The procedure represents a new approach for defining multifrequential dynamic equivalent signals from natural accelerograms. With this approach, the resulting equivalent signals satisfy the criteria of spectral, energy and kinematic equivalence to the related natural prototypes.

The proposed approach for generating multifrequential dynamic equivalent signals via LEMA\_DES is very reliable for experimental applications. These applications include analogue laboratory modelling with shaking table or centrifuge devices, as well as numerical simulations based on FDM, FEM or BEM codes, focused on seismically-induced effects (e.g. local seismic response, gravitational instability and loose soil liquefaction).

## RECORDING OF THE HONSHU GROUND MOTION IN THE CENTRAL APENNINES

The record of the Honshu earthquake of 11 March 2011, obtained in the central Apennines (Italy), is discussed below. The



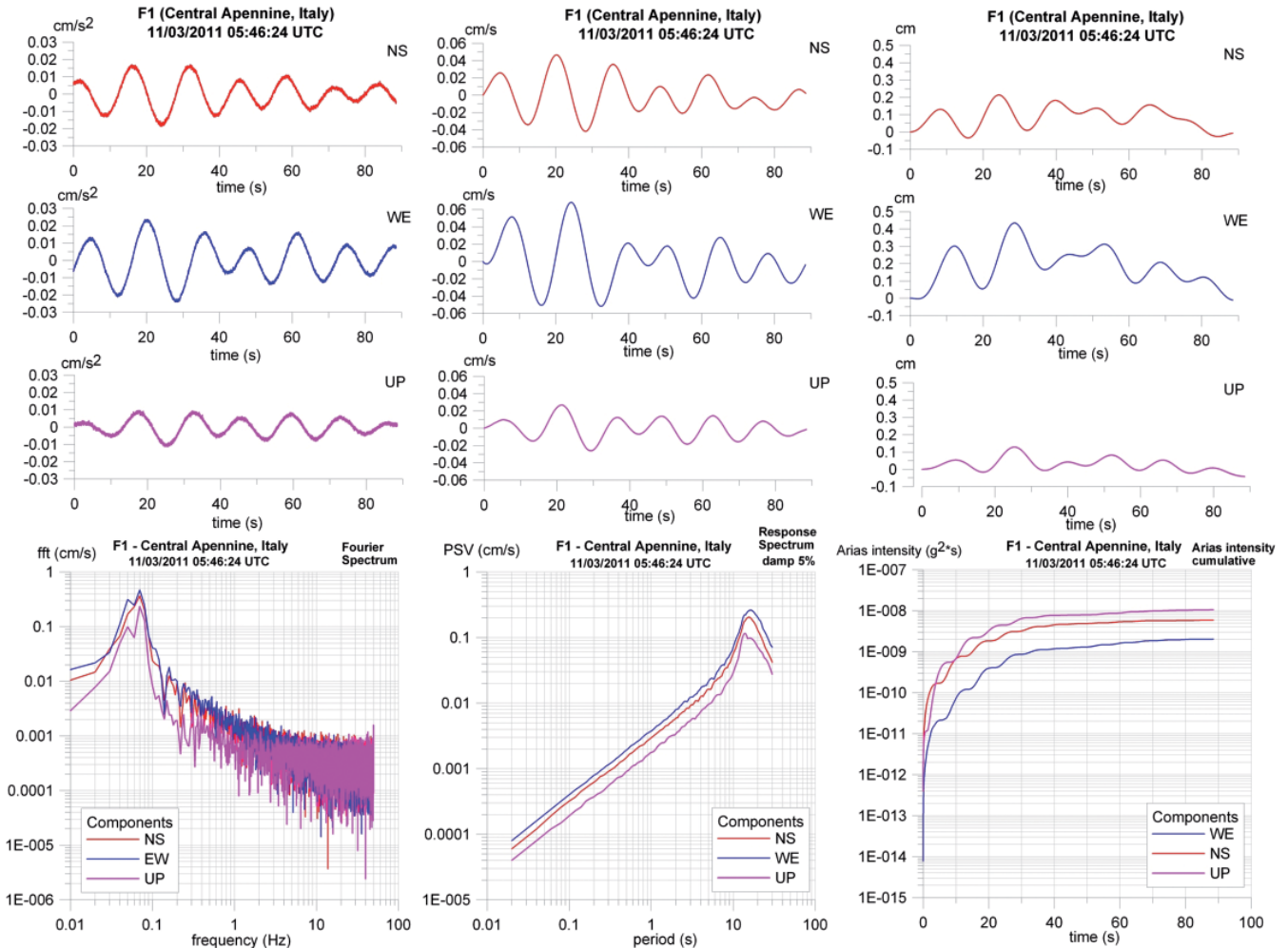


Fig. 12 - Analisi della forma d'onda della stazione accelerometrica F1 in Appennino Centrale (Italia)  
 - Analysis of the waveform of the accelerometric record of station F1 in the central Apennines (Italy)

la registrazione è stata effettuata da una rete accelerometrica privata localizzata a circa 15 km da Rieti, facente parte di un sistema di monitoraggio integrato gestito dal Centro di Ricerca per i Rischi Geologici (CERI) dell'Università di Roma "Sapienza" (<http://www.ceri.uniroma1.it>) in cooperazione con l'IFSTTAR (*The French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks* - Parigi, Francia) e l'ENEA (*Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile* - C.R. Casaccia, Roma, Italia). Più in particolare la rete è localizzata all'interno di gallerie ospitate in un versante carbonatico ed è strumentata con accelerometri triassiali (EPISENSOR KINEMATRICS) installati direttamente su roccia, connessi via cavo ad un acquirente K2 KINEMATRICS a 24 bit e a 130 dB (che garantisce dunque una acquisizione con risoluzione a 250 p/s), e settati ad un tempo assoluto locale tramite GPS.

Due filtri passa banda della libreria KINEMATRICS ("classic

record was generated by a private accelerometric network, located about 15 km from Rieti and making part of an integrated monitoring system; the system is operated by the Research Centre for Geological Risks (CERI) of the Sapienza University of Rome (<http://www.ceri.uniroma1.it>) in co-operation with the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR - Paris, France) and with the Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA R.C. Casaccia - Roma, Italy). In particular, the network is located within tunnels hosted in a carbonate slope and is equipped with 4 triaxial accelerometers (EPISENSOR KINEMATRICS), directly installed on the bedrock and connected via a cable to a 24-bit, 130-dB digital data logger (K2 KINEMATRICS), with sampling at 250 p/s and set to the absolute local time by a GPS device.

Two pass-band filters of the KINEMATRICS library ("clas-

strong motion” con una banda passante 1-10 Hz e “IIRC” con una banda passante di circa 1-20 Hz) sono stati applicati alternativamente ai canali di ogni stazione. Inoltre, alcuni canali sono stati settati con una soglia di *trigger* rispetto al rispettivo livello di rumore mentre altri sono stati settati in una modalità di *trigger STA/LTA* (*short time amplitude/long time amplitude*) particolarmente adeguata per la registrazione dei terremoti di bassa magnitudo. Due canali su 12 sono richiesti per avviare la registrazione.

Alcune caratteristiche peculiari delle registrazioni vengono presentate in Fig. 12.

Le registrazioni sono state processate tramite il codice SAC per ricavare le storie temporali relative alle velocità e agli spostamenti. Inoltre, sono state ottenute le trasformate di Fourier (FFTs) dei segnali temporali, gli spettri di risposta in pseudovelocità al 5% di smorzamento nell'intervallo 0-20 s e le intensità cumulate di Arias.

I dati così analizzati mostrano che lo scuotimento registrato: ha raggiunto un'accelerazione di 25 mg sulle componenti orizzontali e circa 10 mg sulla componente verticale; presenta uno spettro di Fourier in accelerazione caratterizzato da una frequenza dominante di 0.07 Hz, ovvero un periodo di 14 s; raggiunge picchi in spostamento di 5 mm; ha una durata di circa 100 s; ha un'Intensità di Arias di circa  $3E+07$   $g^2/s$ , ovvero dello stesso ordine di grandezza dei valori di Intensità di Arias ottenuti per i terremoti di magnitudo da 4 a 5 con epicentri nei settori dei Monti Reatini e del Massiccio del Gran Sasso e di un ordine di grandezza più elevato dei valori di Intensità di Arias calcolati dalle registrazioni dei terremoti recenti della penisola balcanica (Mw 5.4) e del Mar Tirreno meridionale (Mw 5.3) (Fig. 13).

“strong motion” with a pass-band of about 1-10 Hz and “IIRC” with a band-pass of about 1-20 Hz) were alternatively applied to the channels of each station. Moreover, some channels were set to a trigger threshold vs. their respective noise level, while others were set in STA/LTA (Short Time Amplitude/Long Time Amplitude) trigger mode, which is particularly suitable for detecting low-magnitude earthquakes. Only 2 channels out of 12 were required for triggering the network.

Fig. 12 exhibits some features of the recorded waveforms.

The three components of the waveforms were processed by means of SAC in order to derive velocigrams and displacement time histories. Moreover, Fast Fourier Transforms (FFTs), 5% damped response spectra in the 0-20 s range and cumulated Arias intensities were computed.

The data so processed show that the recorded ground motion reached 25 mg on the horizontal components and about 10mg on the vertical one; it had a dominant FFT frequency of roughly 0.07 Hz, i.e. a period of about 14 s; it reached PGDs of 5 mm and had a duration of about 100 s; its Arias intensity was about  $3.0E-7$   $g^2/s$ , i.e. of the same order of magnitude as the Arias values computed for earthquakes with magnitude 4-5 located in the Reatini Mts. and Gran Sasso Massif seismogenic areas and about one order of magnitude higher than the Arias intensity values computed for the recent earthquakes in the Balkan peninsula (Mw 5.4) and in the southern Tyrrhenian Sea (Mw 5.3) (Fig. 13).

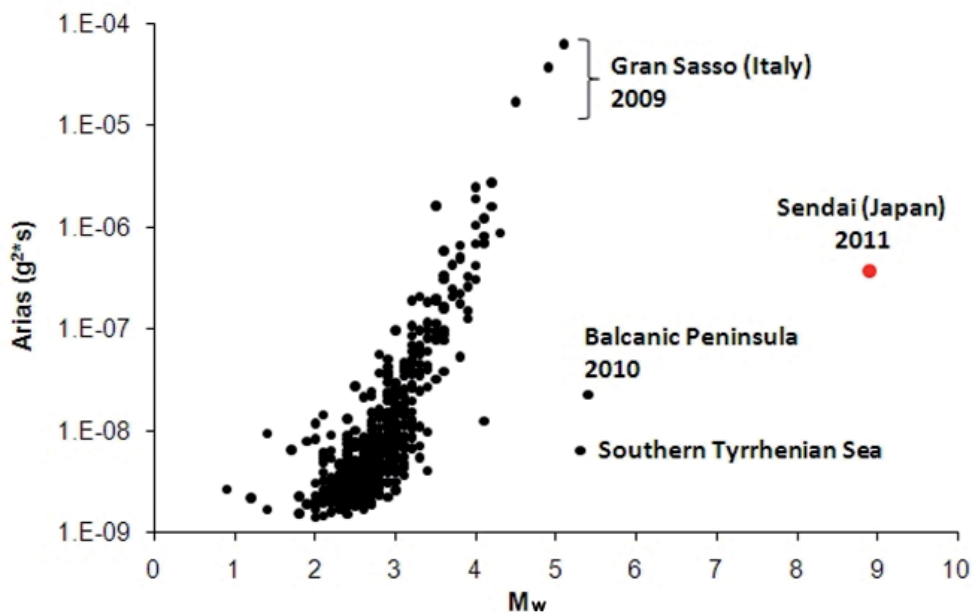
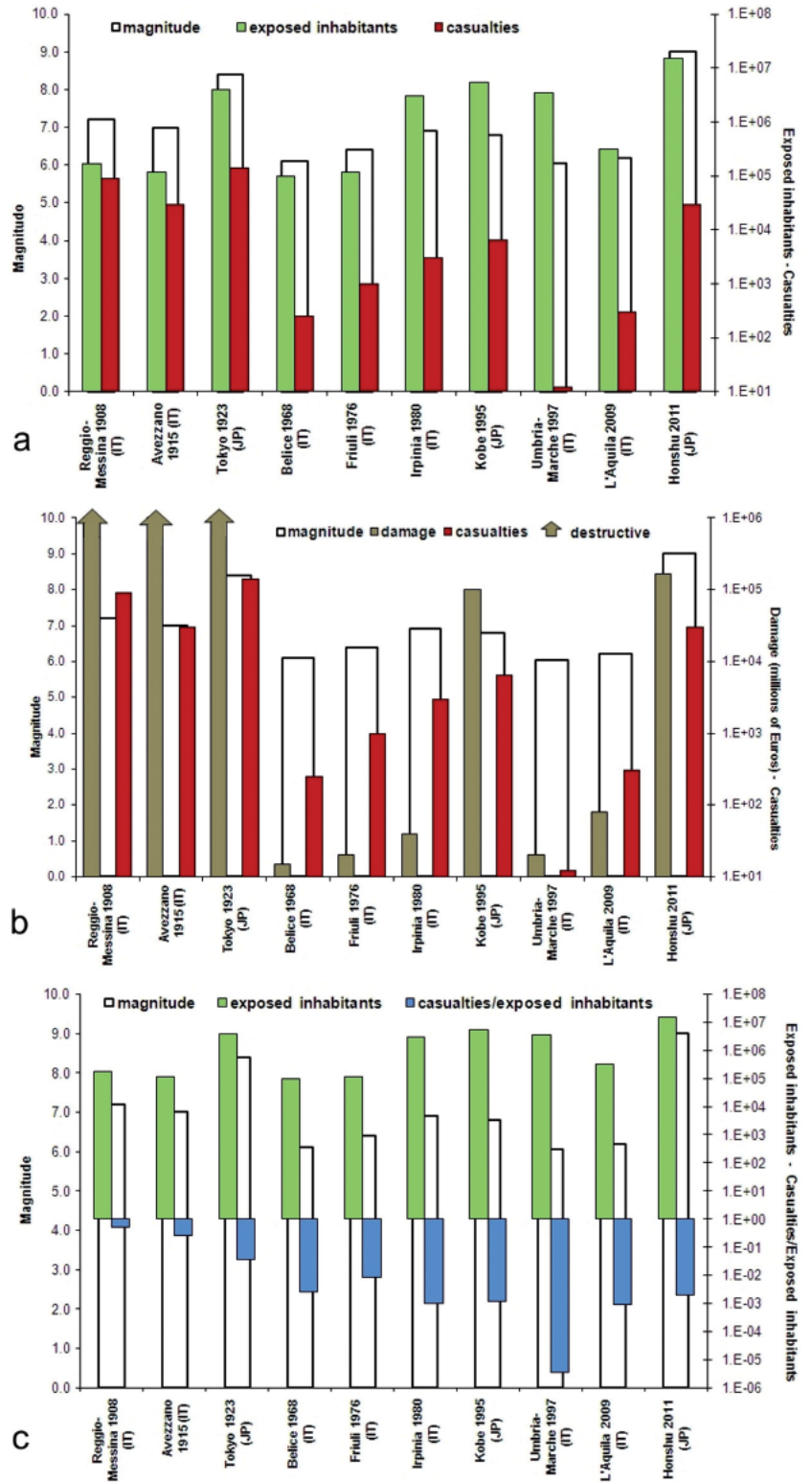


Fig. 13 - Intensità di Arias vs. Mw per i terremoti registrati alla stazione F1 in Appennino Centrale (Italia)  
 - Arias intensity vs. Mw for the earthquakes recorded at station F1 in the central Apennines (Italy)

Fig. 14 – a) Valori di magnitudo, morti e abitanti esposti relativi ai terremoti italiani di  $M_w > 5.5$  e giapponesi di  $M_w > 6.5$  avvenuti nel corso dell'ultimo secolo; b) valori di magnitudo, morti e danni (in milioni di Euro) relativi ai terremoti italiani di  $M_w > 5.5$  e giapponesi di  $M_w > 6.5$  avvenuti nel corso dell'ultimo secolo, le frecce indicano un danno non quantificabile poichè associato a terremoti distruttivi; c) valori di magnitudo, abitanti esposti e rapporto morti/abitanti esposti (la diminuzione della lunghezza della barra corrisponde ad un aumento della percentuale delle perdite) riferiti ai terremoti italiani di  $M_w > 5.5$  e giapponesi di  $M_w > 6.5$  avvenuti nel corso dell'ultimo secolo  
 a) Values of magnitude, casualties and exposed inhabitants for the  $M_w > 5.5$  Italian earthquakes and the  $M_w > 6.5$  Japanese earthquakes occurred in the last century; b) values of magnitude, casualties and damages (in million euro) for the  $M_w > 5.5$  Italian earthquakes and the  $M_w > 6.5$  Japanese earthquakes occurred in the last century; the arrows express non-detectable damages from destructive earthquakes; c) values of magnitude, exposed inhabitants and casualties/exposed inhabitants ratio (the shorter bars express a higher percentage of casualties) for the  $M_w > 5.5$  Italian earthquakes and the  $M_w > 6.5$  Japanese earthquakes occurred in the last century





## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Prime considerazioni in merito agli effetti ed ai danni causati dal terremoto di Honshu del 11 Marzo 2011 possono essere tratte analizzando i resoconti relativi al rapporto tra magnitudo, danni (espressi in milioni di Euro – fonte: Word Bank – The Economist), morti e numero di abitanti esposti, riferiti ai più distruttivi terremoti ( $M_w > 5.5$ ) avvenuti in Italia nell'ultimo secolo ed ai più distruttivi terremoti ( $M_w > 6.5$ ) avvenuti nello stesso periodo in Giappone (Fig. 14).

Tutti i terremoti considerati hanno coinvolto popolazioni più numerose di 10.000 abitanti fino ad un massimo di 15.000.000 raggiunto, per l'appunto dal sisma di Honshu (Fig. 14a). Tuttavia, le più elevate percentuali di morti causati dai terremoti considerati rispetto alla popolazione colpita (ovvero i più alti rapporti morti/abitanti esposti) si registrano per i terremoti italiani di Reggio e Messina del 1908 (rapporto morti/abitanti pari a circa 53%) e di Avezzano del 1915 (rapporto morti/abitanti esposti pari a circa 25%) seguiti dal terremoto di Tokio del 1923 (rapporto morti/abitanti esposti pari a circa 3.5%) e di Kobe del 1995 che, tuttavia, presenta una magnitudo di circa un ordine e mezzo più elevata (Fig. 14b).

Si può inoltre constatare (Fig. 14c) che, a partire dal secondo dopoguerra, sia in Italia che in Giappone il rapporto morti/abitanti esposti per i terremoti considerati si mantiene inferiore all'1%. Tuttavia, si deve rilevare che in riferimento agli ultimi due eventi sismici (terremoto italiano de L'Aquila del 2009 e terremoto giapponese di Honshu del 2011), a fronte di un valore pressoché uguale di rapporto morti/abitanti esposti, corrispondono magnitudo aventi una differenza di circa tre ordini di grandezza; va oltretutto rimarcato che il valore del rapporto nel caso del terremoto di Honshu tiene conto anche del numero di vittime causato dall'onda di tsunami e dunque non direttamente legato agli effetti dello scuotimento.

Di contro, i più elevati valori in termini di danno (Fig. 14c), fatta eccezione per le distruzioni causate dai succitati sismi di Reggio e Messina, Avezzano e Tokio, restano ad appannaggio dei sismi giapponesi di Kobe (1995) e Honshu (2011), risultando superiori ai 100.000 milioni di Euro (fonte: Word Bank – The Economist).

## REFERENCES

- FIELD E.H. & JACOB K. (1995) - *A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent*. Bull. Seism. Soc. Am., **85**: 1127–1143.
- LENTI L. & MARTINO S. (2010) - *New procedure for deriving multifrequential dynamic equivalent signals (LEMA\_DES): a test-study based on Italian accelerometric records*. Bulletin of Earthquake Engineering, **8**: 813-846 (DOI. 10.1007/s10518-009-9169-7).
- PRESTININZI A., PUGLIESE A. & ROMEO R.W. (2005) - *Proposed seismic classification of Italy and related actions*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1/2005**. DOI:10.4408/IJEGE.2005-01.O-04.
- SATAKE K., SAWAI Y., SHISHIKURA M., OKAMURA Y., NAMEGAYA Y. & YAMAKI S. (2007) - *Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #T31G-03.
- SI H. & MIDORIKAWA S. (1999) - *Attenuation Relations for Peak Ground Acceleration and Velocity Considering Effects of Fault Type and Site condition*. Journal of Structural Construction Engineering, **523**: 63-70.
- STRONG MOTION CENTER: [http://strongmotioncenter.org/cgi-bin/ncesmd/iqr\\_dist\\_DM2.pl?iqrID=Japan\\_11Mar2011&SFlag=0&Flag=1](http://strongmotioncenter.org/cgi-bin/ncesmd/iqr_dist_DM2.pl?iqrID=Japan_11Mar2011&SFlag=0&Flag=1)

## CONCLUDING REMARKS

Preliminary considerations on the effects and damages caused by the Honshu earthquake of 11 March 2011 may be drawn from the analysis of reports on magnitude, damages (expressed in million euro – source: Word Bank – The Economist), casualties and number of exposed inhabitants for the most destructive earthquakes ( $M_w > 5.5$ ) occurred in Italy in the last century and the most destructive earthquakes ( $M_w > 6.5$ ) occurred in Japan in the same time interval (Fig. 14).

All the investigated earthquakes involved more than 10,000 inhabitants (15,000,000 for the Honshu earthquake) (Fig. 14a). Nevertheless, the highest percentages of casualties with respect to the exposed population (i.e. the highest ratios of casualties to exposed inhabitants) were recorded for the Italian earthquakes of Reggio and Messina in 1908 (casualties/exposed inhabitants: about 53%) and Avezzano in 1915 (casualties/exposed inhabitants: about 25%), followed by the ones of Tokyo in 1923 (casualties/exposed inhabitants: about 3.5%) and Kobe in 1995 (casualties/exposed inhabitants: about 1.2%); however, the Kobe earthquake had an order of magnitude about 1.5 higher than the one of the Tokyo earthquake (Fig. 14b).

Additionally (Fig. 14c), after the second world war, the ratio of casualties to exposed inhabitants remained below 1% in both Italy and Japan. Nonetheless, the latest two seismic events (L'Aquila earthquake in 2009 and Honshu earthquake in 2011) had an almost equal ratio of casualties to exposed inhabitants, in spite of a difference of about 3 orders of magnitude. This finding is particularly significant, since the ratio for the Honshu earthquake also takes into account the casualties caused by the tsunami wave, i.e. not directly related to seismic shaking.

By contrast, except for the highly destructive earthquakes of Reggio and Messina, Avezzano and Tokyo, the greatest damages, exceeding a value of €100,000 million (source: Word Bank - The Economist-2011), have so far been caused by the Japanese earthquakes of Kobe and Honshu (Fig. 14c).

*Received April 2011 - Accepted May 2011*