

Il terremoto di Tohoku dell'11 marzo 2011

La sequenza sismica che ha interessato la costa orientale del Giappone ha visto diversi eventi di magnitudo elevata. A seguito della scossa principale dell'11 marzo, le strutture hanno vibrato a lungo in tutto il Giappone ma i danni principali sono stati dovuti allo tsunami. L'allarme è stato diramato e ha salvato numerose persone. Ottimo è stato il comportamento degli edifici dotati di isolamento sismico

■ Giovanni Bongiovanni, Paolo Clemente, Vladimiro Verrubbi

L'evento sismico

La scossa dell'11 marzo 2011 (05:46 UTC) è stato l'evento principale di una sequenza sismica iniziata qualche giorno prima e proseguita per diversi giorni con numerosi eventi di particolare rilevanza. Già il 9 marzo (02:45 UTC) era stato registrato un evento di magnitudo $M = 7.2$ (Lat. 38.424°N , Long. 142.836°E) seguito da 16 eventi di $M > 5$ (tre di $M > 6$, uno $M > 7$). Altre 5 scosse con $M > 5$ si sono verificate il giorno dopo. L'11 marzo, dopo l'evento principale di $M = 9.0$, che ha avuto una durata di alcuni minuti, ci sono state più di cento scosse di $M > 5$, di cui venti con $M > 6$. Nei giorni successivi sono state registrate diverse decine di scosse al giorno di $M \geq 5$, di cui alcune con $M \geq 6$. La sequenza sismica è andata, quindi, lentamente riducendosi, ma alcune scosse con $M > 7.0$ hanno fatto vibrare ancora le strutture in tutto il Giappone.

L'evento principale si è verificato a circa 130 km dalla costa dell'isola di Honshu, ad una profondità di 24,4 km. La città più vicina è Sendai (130 km); altre città in-

teressate sono Yamagata (178 km E) e Fukushima (178 km ENE); Tokyo è a 373 km dall'epicentro. Altri eventi di minore intensità hanno avuto epicentro più vicino a Tokyo.

Come è noto, il Giappone è vicino al margine convergente tra la placca pacifica e quella euro-asiatica; la prima si immerge sotto la seconda (subduzione) con una velocità di circa 83 mm/anno. La rottura, avvenuta secondo un meccanismo di tipo *thrust fault*, ha interessato un'estensione della faglia di oltre 500 km. L'evento ha causato uno tsunami che ha investito la vicina costa giapponese ma anche quella russa, a nord, e dopo diverse ore quella californiana. Alcune osservazioni, quali la variazione dell'asse terrestre, l'aumento della velocità di rotazione terrestre, con conseguente accorciamento della durata del giorno di 1.6 microsecondi, e lo spostamento di alcuni metri dell'isola di Honshu, dimostrano l'eccezionalità del fenomeno.

La rete accelerometrica giapponese K-Net (figura 1) ha registrato i valori di picco riportati in figura 2, da cui è evidente che l'area delle centrali di Fukushima ha subito accelerazioni con picco fino a 0.5 g.

In figura 3 la registrazione al sito FKS011, poco a sud dell'impianto nucleare di Fukushima Daiichi; a nord si sono avuti valori di accelerazione massima maggiori; diverse stazioni quali la FKS007 e la FKS010 in prossi-

■ Giovanni Bongiovanni, Paolo Clemente, Vladimiro Verrubbi
 ENEA, Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e
 Risanamento Ambientale

mità degli impianti nucleari sono state danneggiate e da esse non si hanno registrazioni. Vanno evidenziati il valore massimo di accelerazione (2.7g) registrato alla stazione MYG004, a 183 km dall'epicentro, nella prefettura di Miyagi (figura 4), e il contenuto in frequenza della registrazione CHB002 nella prefettura di Chiba (figure 5-6), a 363 km dall'epicentro.

In figura 7 si riporta la mappa della pericolosità sismica per il Giappone in termini della scala JMA (*Japan Meteorological Agency*), che prevede valori di intensità da 0 a VII al sito, con i livelli V e VI divisi in due sottolivelli. Le diverse gradazioni di colore indicano probabilità di accadimento di eventi che danno intensità JMA maggiore o uguale a "VI bassa", corrispondente a circa 0.4g. Va osservato come la mappa, che risale al 1995, sia in disaccordo con quanto realmente accaduto negli anni successivi e, in particolare, con la distribuzione dei picchi di figura 2.

Lo tsunami

Come detto, l'evento ha causato uno tsunami che ha investito la vicina costa giapponese ma anche quella russa, a nord, e dopo diverse ore quella californiana.

Anche l'allarme tsunami è stato diramato, ma è vivo il dubbio che diversi allarmi precedenti non concretizzati abbiano indotto molti cittadini a sottovalutare l'allarme stesso. Come è noto, la velocità di propagazione delle onde dello tsunami cresce con legge non lineare con la profondità del mare e varia, in genere, tra 300 e 1.000 km/h. Nella figura 8 è riportata la registrazione di un mareografo in posizione non molto distante dalla costa dell'area di Fukushima. Si legge un intervallo di circa 25 min tra sisma (14:46) e tsunami (15:10).

Le onde hanno raggiunto sulle coste giapponesi un'altezza massima misurata di oltre 7.0 m e immagini video diffuse successivamente mostrano onde di circa 15 m sulla centrale di Fukushima.

Dai dati diffusi relativi alle previsioni e alle letture degli orari relativi agli arrivi delle prime onde e quelli dei massimi, per diversi siti sulla costa, sono stati individuati i siti più vicini a quello delle centrali di Fukushima: a Soma, a nord delle centrali, le prime onde sono arrivate dopo meno di 10 min, con altezza di 0.30 m, mentre il picco si è avuto dopo oltre 1 ora con onde di 7.30 m, pari al massimo osservato su tutta la costa; a Fukushima Onahama-oki, a sud delle centrali, ma più vicino ad esse rispetto a Soma, le onde sono arrivate

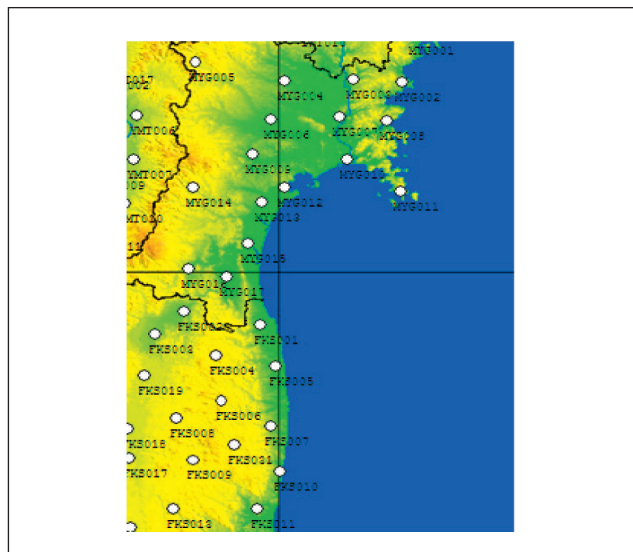


FIGURA 1 Localizzazione delle stazioni accelerometriche
Fonte: <http://www.bosai.go.jp/e/>

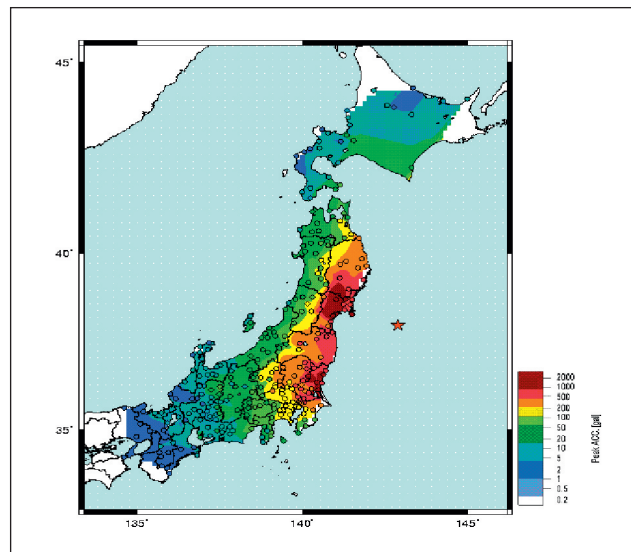


FIGURA 2 Valori di picco registrati durante l'evento dell'11/03/2011
Fonte: <http://www.bosai.go.jp/e/>

addirittura dopo soli 6 min, ma non si ha notizia del massimo, che potrebbe essere stato anche maggiore di quello di Soma. In definitiva, si può asserire che ai siti degli impianti di Fukushima le onde significative sono giunte in 30-50 min, mentre il picco si è verificato 65 min dopo l'evento sismico. Ciò è coerente anche con alcune simulazioni che, tarate su altri siti, forniscono per l'area delle centrali di Fukushima tempi compresi tra 45 e 50 min.

L'early warning

L'allarme è stato tempestivo ed efficace, dando diversi secondi di vantaggio per intervenire su impianti a rischio e treni ad alta velocità. Va ricordato che il sistema *early warning* funziona su elementi di valutazione concettualmente semplici.

Il terremoto genera onde P, più veloci, e onde S, circa 1.7 volte più lente delle P, ma più pericolose; al primo arrivo delle onde P va valutata la magnitudo; se la magnitudo è alta può essere diramato un allarme con un preavviso pari all'intervallo tra l'istante di valutazione e il tempo di arrivo delle onde S al punto di misurazione; tale preavviso diventa maggiore man mano che ci si allontana dal punto di misurazione.

Il sistema di allarme ha un'utilità immediata per sistemi particolari, per i quali alcuni secondi possono essere vitali per portarsi in condizioni di sicurezza o di minore vulnerabilità, come ad esempio i treni ad alta velocità. Nel caso del terremoto di Tohoku il tempo a disposizione è stato di 8-30 s per le coste più vicine.

Principali effetti del sisma e dello tsunami

I danni dovuti al sisma sono relativamente limitati e, comunque, sono stati "oscurati" dagli effetti successivi dello tsunami, che ha anche causato la maggior parte delle vittime.

L'area più vicina all'epicentro è quella della città di Sendai, di circa 1 milione di abitanti, dove il porto, dotato anche di terminale petrolifero, e l'aeroporto sono stati devastati dallo tsunami, che si è spinto fino a 5 km all'interno della prefettura di Fukushima. In città si sono verificati diversi incendi, uno dei quali ha fatto esplodere un impianto petrolchimico della JX Nippon Oil di Shiogama. Un altro incendio, scoppiato vicino a una scuola media nel quartiere Miyagino, ha costretto circa 600 persone a rifugiarsi sul tetto dell'istituto.

La diga di Fujinuma, vicina alla località di Sukagawa

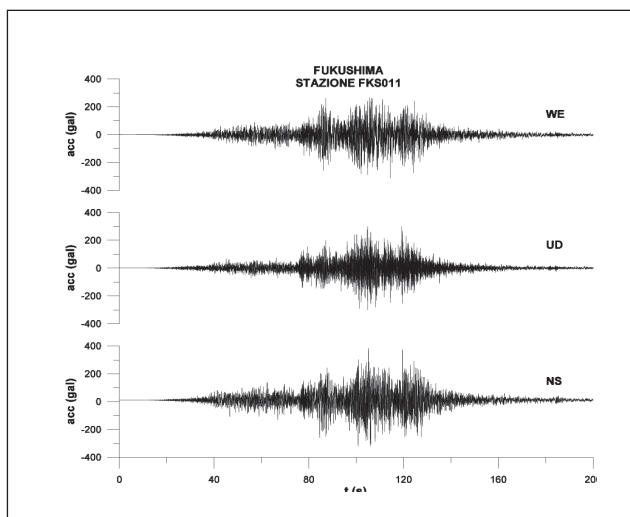


FIGURA 3 Time history al sito FKS011

Fonte: elaborazioni ENEA su dati <http://www.j-shis.bosai.go.jp>

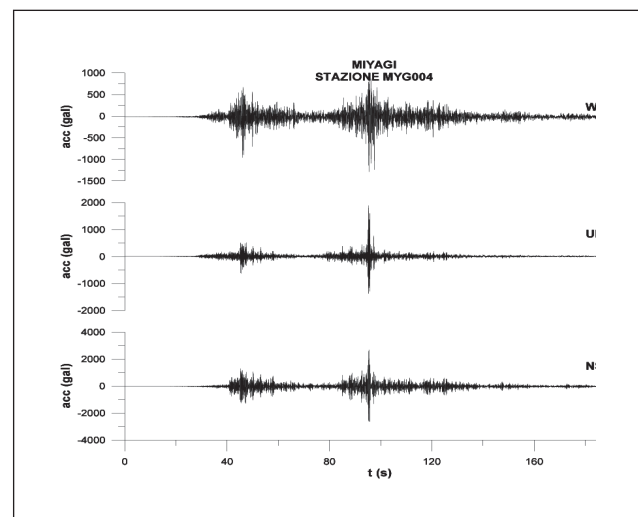


FIGURA 4 Time history al sito MYG004

Fonte: elaborazioni ENEA su dati <http://www.j-shis.bosai.go.jp>

nella prefettura di Fukushima. Il cui vaso veniva utilizzato per l'irrigazione delle terre circostanti, è crollata e un'ondata di acqua e fango si è riversata nella vallata sottostante, travolgendo decine di abitazioni.

Una nave con 100 persone a bordo è stata travolta dall'onda di tsunami. Sono scomparsi quattro treni operativi lungo la zona costiera delle prefetture di Miyagi e Iwate, poi ritrovati. Molti treni sono stati travolti dal fango accumulato dallo tsunami.

A Tokyo gli edifici hanno tremato per diversi minuti (testimonianze raccontano di oscillazioni degli edifici alti fino a 15-20 min) e circa 4 milioni di abitazioni sono rimaste senza luce. Al momento della scossa, avvenuta in orario lavorativo, la popolazione presente nella capitale era il doppio di quella residente, pari a 13 milioni.

Gravi sono stati i problemi ai trasporti: sono stati bloccati gli aeroporti di Narita e Haneda, nonché treni e metropolitane, che hanno ripreso a funzionare dopo diverse ore. L'antenna della Tokyo Tower, simbolo della città e della ricostruzione post-bellica, che trasmette segnali TV e radio per conto di importanti emittenti giapponesi, si è piegata (la Tokyo Tower, alta 332,6 m, fu costruita nel 1958 dallo studio Nikken Sekkei, ispirandosi alla Torre Eiffel).

Ha retto bene, invece, la Tokyo Sky Tree, torre per telecomunicazioni, in costruzione su progetto dell'architetto Tadao Ando e dello scultore Kiichi Sumikawa e commissionata da un gruppo di sei emittenti terrestri con a capo l'emittente pubblico giapponese (NHK) che, alla conclusione dei lavori prevista per la fine del 2011, raggiungerà un'altezza complessiva di circa 610 m e sostituirà la Tokyo Tower, non più sufficientemente alta per garantire la copertura del segnale nella città, a causa dei molti grattacieli.

Sempre nell'area di Tokyo sono andate in tilt le comunicazioni telefoniche, sia da telefono fisso che da cellulare; ha invece funzionato regolarmente internet, consentendo le comunicazioni in tempo reale. Le connessioni dati dei cellulari hanno retto a singhiozzo consentendo le comunicazioni via Twitter e, in alcuni casi, anche di chiamate mediante servizi di voce su dati (Voip) come Skype.

Nell'area di Tohoku ci sono circa 130 edifici isolati sismicamente che hanno superato bene il sisma e non sono stati colpiti dallo tsunami. Anche nell'area di Tokyo, a oltre 450 km dall'epicentro, edifici isolati hanno sopportato molto bene il sisma. Oscillazioni estremamente lunghe (15-20 min) hanno interessato alcuni edifici isolati a Kobe e Osaka, a circa 850 km dall'epicentro,

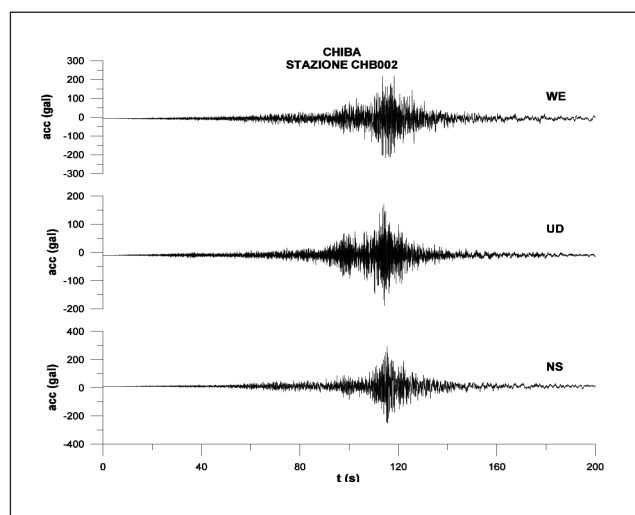


FIGURA 5 Time history al sito CHB002

Fonte: elaborazioni ENEA su dati <http://www.j-shis.bosai.go.jp>

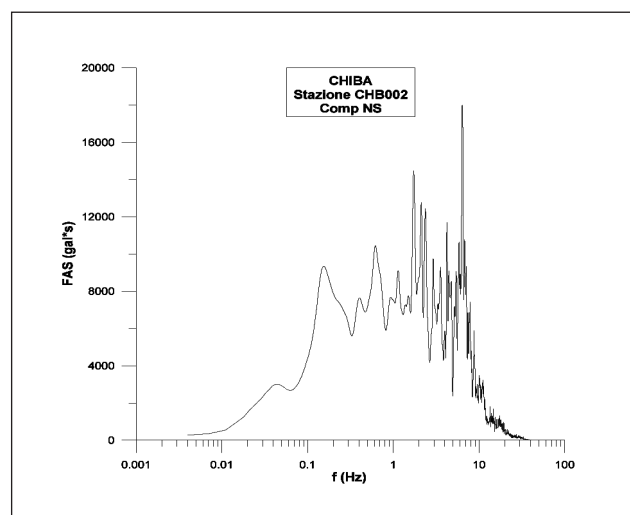


FIGURA 6 Spettro di Fourier della registrazione al sito CHB002

Fonte: elaborazioni ENEA su dati <http://www.j-shis.bosai.go.jp>

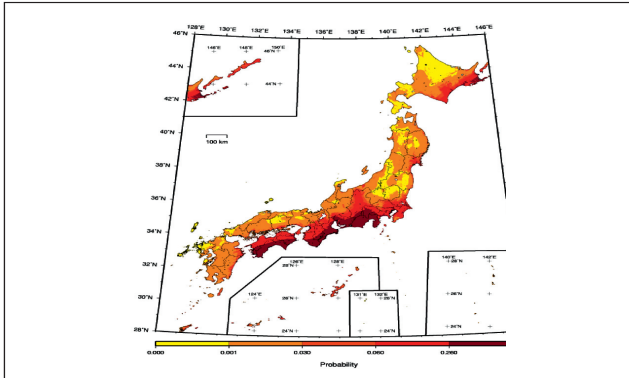


FIGURA 7 Probabilità di eventi con JMA > VI bassa
 Fonte: <http://www.j-shis.bosai.go.jp>

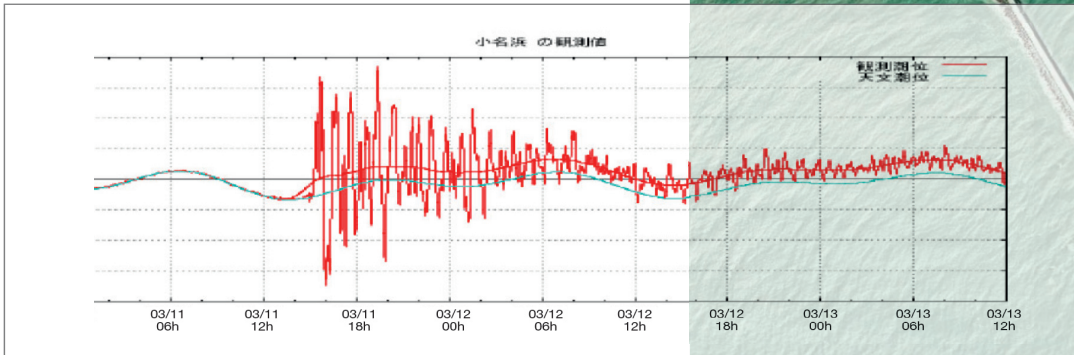


FIGURA 8 Andamento delle onde registrato a largo di Fukushima
 Fonte: <http://senweb03.senate.ca.gov/focus/static/sd10/earthquakeUSGS.pdf>

dovute anche al basso valore dello smorzamento dei dispositivi di isolamento adottati. A Fukushima un edificio isolato è stato uno dei pochi luoghi sicuri per la gestione dell'emergenza ma, purtroppo, in area pericolosa per la radioattività.

Conclusioni

Come sempre da un evento sismico c'è molto da imparare:

- le mappe di pericolosità giapponesi sono state ampiamente smentite dalla realtà: ciò pone seri inter-

rogativi sulle tecniche di valutazione della pericolosità sismica;

- l'*early warning* ha funzionato, ma non ha potuto far molto a fronte dello tsunami, a causa dello scarso tempo tra l'allarme e l'arrivo delle onde sulle coste;
- le strutture hanno resistito piuttosto bene al sisma ma, quelle di scarsa consistenza, non hanno potuto nulla a fronte dell'onda anomala, mentre gli edifici più alti e meglio incastrati al suolo hanno sopportato bene anche lo tsunami, fornendo ricovero a molte persone.