

# Aggiornamento sul terremoto $M_W = 9.0$ di Tohoku dell'11 marzo 2011

D. Bolognini<sup>1</sup> ■

## Introduzione

Nei giorni immediatamente successivi al violento terremoto che l'11 marzo 2011 ha colpito le coste nord-orientali del Giappone, la redazione di Progettazione Sismica ha ricevuto numerosi documenti informativi circa l'esito dei sopralluoghi preliminari effettuati da diversi gruppi di lavoro che si sono attivati pochissime ore dopo l'evento sismico. Il contenuto di questa corrispondenza è stato riassunto e presentato ai Lettori nel numero precedente di questa rivista, poiché si è ritenuta utile e doverosa la divulgazione delle informazioni relative ai danni dovuti allo scuotimento, al fine di trarre, fra l'altro, gli opportuni spunti di riflessione per quanto riguarda sia la corretta realizzazione di particolari costruttivi nell'ambito di progetti in zona sismica, sia l'attività di progettazione in generale.

A pochi giorni di distanza dai tragici eventi, il livello di danneggiamento provocato direttamente dal sisma prima dell'occorrenza dello tsunami, in accordo con quanto descritto nei report preliminari, è immediatamente apparso modesto in confronto ai valori di scuotimento molto importanti (in alcuni casi inaspettatamente elevati) registrati in svariate zone del territorio giapponese. Se da un lato tale positivo riscontro poteva essere giustificato dall'efficace progettazione antisismica delle strutture nuove ed al miglioramento di quelle esistenti, aspetti da decenni particolarmente curati in Giappone, è sembrato comunque lecito chiedersi se, al di là di particolari effetti legati alle caratteristiche dello scuotimento stesso, tutti i danni nei loro molteplici aspetti fossero stati veramente efficacemente evidenziati durante i sopralluoghi preliminari. Questa osservazione è legata fondamentalmente al breve tempo trascorso dall'evento sismico (pochi giorni) in relazione alla vasta estensione del territorio interessato ed al fatto che a livello mediatico tramite carta stampata e notiziari, si sia dato enorme risalto ai tragici effetti dello tsunami ed all'incidente occorso alla centrale nucleare di Fukushima, com'è giusto che fosse,

ma non siano stati trattati e mostrati estensivamente, almeno nelle immediate ore susseguenti il sisma ed indipendentemente dalla loro entità, i danni provocati dallo scuotimento alle costruzioni ed alle infrastrutture.

Il dossier apparso nel numero precedente è stato concluso affermando che in ogni caso questa immane catastrofe solleva, dal punto di vista ingegneristico e non solo, molti interrogativi che dovranno trovare risposta nell'ambito delle strategie per la riduzione del rischio sismico, in quanto sia le tracce temporali del movimento del terreno, sia i rispettivi spettri di risposta presentano caratteristiche in parte inaspettate e solo approfondite analisi future potranno indicare quali effetti sulle strutture hanno avuto e, se del caso, quali modifiche richiederanno ai metodi di progettazione attuali.

Per i motivi sopraccitati, alla luce degli ulteriori e maggiormente meditati report pervenuti in redazione verso la fine dello scorso mese di aprile e comunque dopo la pubblicazione del numero precedente della rivista, si è deciso di pubblicare il presente aggiornamento, in cui sono descritti in maggiore dettaglio alcuni fra i principali argomenti non totalmente approfonditi in precedenza.

A tal proposito si ringraziano:

- I professori Hiroyuki Goto (Kyoto University), Kazuhiko Kawashima (Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology), Motoki Kazama, (Tohoku University, Sendai), Takashi Kiyota (University of Tokyo), Susumu Nakamura (Nihon University, Fukushima), Yoshikazu Takahashi (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Ikuo Towhata (University of Tokyo), Akihiko Wakai (Gunma University, Kiryu), Kazue Wakamatsu (Kanto Gakuin University, Yokohama), Susumu Yasuda (Tokyo Denki University, Saitama) e Nozomu Yoshida (Tohoku Gakuin University, Tagajo).
- Tomomi Fujita e Masayuki Iifuji (Sendai Technical College).

<sup>1</sup> Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ davide.bolognini@eucentre.it

Ancora una volta una nota particolare va al professor Shunsuke Otani, docente presso l'Università di Tokyo e componente del corpo docenti della ROSE School di Pavia, per la traduzione dal giapponese all'inglese anche degli ultimi documenti pervenuti.

### 1. Ulteriori dettagli e spunti di riflessione legati allo scuotimento del suolo

Alcuni fra i dati maggiormente importanti (accelerogrammi e spettri in spostamento) riguardanti lo scuotimento del suolo delle zone rilevate durante i sopralluoghi sono stati descritti e commentati nel numero precedente della rivista. Le ulteriori informazioni descritte nel seguito provengono da documenti maggiormente elaborati e meditati rispetto a quelli prodotti nell'immediatezza dei primi sopralluoghi effettuati.

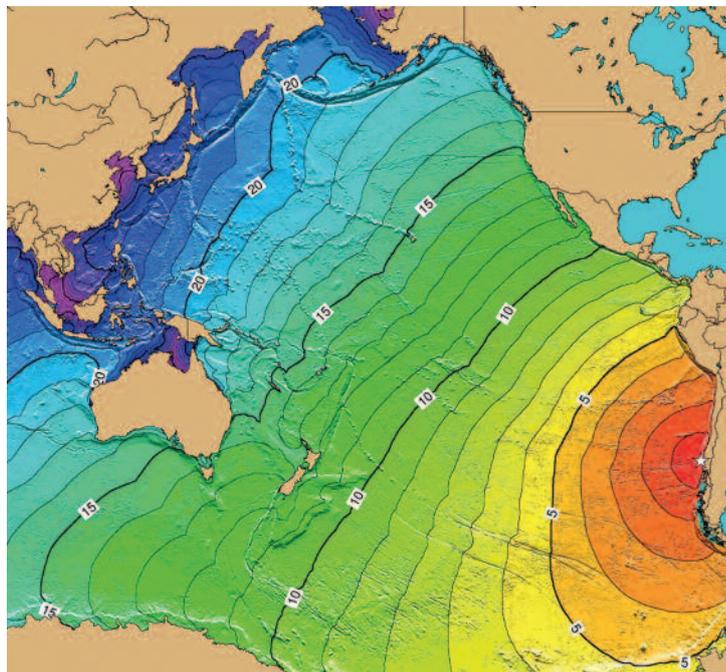
La faglia all'origine del terremoto di marzo, che per intensità è da classificare come uno degli eventi maggiori degli ultimi cento anni ed il principale nell'area giapponese dopo l'evento conosciuto come Great Kanto Earthquake (1923), è situata al largo della costa Pacifica del Giappone in corrispondenza della linea di subduzione fra la placca tettonica oceanica e l'arcipelago giapponese. In particolare, la città di Sendai, che con circa un milione di abitanti è il principale centro abitato più vicino all'epicentro del terremoto dello scorso marzo, e la zona circostante (Prefettura di Miyagi) erano già state segnalate in passato a causa dell'elevata probabilità di accadimento di un terremoto

Si ricorda infine che i dati relativi allo scuotimento sono stati scaricati dal sito web dell'Istituto Nazionale di Ricerca per le Scienze della Terra e la Prevenzione dei Disastri (NIED, 2011) e sono stati preliminarmente processati dai curatori dell'edizione italiana.

di proporzioni considerevoli. La realtà (magnitudo  $M_w$  9.0) ha di fatto superato quelle che erano le previsioni (terremoto di magnitudo  $M_w$  8.3 con una probabilità del 99% in 30 anni, si veda a tale proposito la rubrica "Qui INGV" pubblicata sul precedente numero di Progettazione Sismica).

Negli ultimi 150 anni, altri due eventi importanti sono degni di nota, ma in entrambi i casi il livello di scuotimento del suolo è stato minore. Il primo, avvenuto nel 1896 e di magnitudo  $M_w$  8.5, è stato seguito da un potente tsunami che ha provocato più di 21000 vittime. Il secondo, risalente al 1933 è stato classificato come  $M_w$  8.4 ed ha causato circa 1500 vittime ed altrettanti dispersi. Al fine di mostrare quanto possano essere devastanti gli effetti di uno tsunami, si cita a titolo di esempio il caso di uno dei terremoti più rilevanti della storia recente, avvenuto in Cile nel 1960 e caratterizzato da una magnitudo pari a  $M_w$  9.5. Esso è stato all'origine di un'onda di tsunami che ha attraversato l'intero Oceano Pacifico, raggiungendo le coste orientali del Giappone 22 ore dopo l'evento sismico stesso (Figura 1). Le onde, di altezza superiori a 3 metri, devastarono la costa dell'isola di

Figura 1  
Propagazione (tempi di percorrenza in ore) dell'onda di tsunami provocata dall'evento sismico di Valdivia (Cile, 1960) (fonte: NOAA National Geophysical Data Center).



Honshu causando la distruzione di più di 1600 edifici e provocando circa 200 vittime, 85 dispersi ed 855 feriti (Iida et al, 1967), con perdite economiche dell'ordine dei 50 milioni di dollari dell'epoca.

Gli eventi occorsi in passato hanno indirizzato sia il settore pubblico, sia quello privato ad investire un quantitativo non trascurabile di fondi per fronteggiare il pericolo legato ai maremoti generati da eventi sismici. Per tale motivo furono edificate opportune barriere, la cui altezza di progetto fu stabilita in funzione delle caratteristiche degli tsunami noti, e vie di fuga per favorire l'evacuazione durante un allarme tsunami. È significativo notare come l'evento dello scorso marzo abbia vanificato tutti i sopraccitati accorgimenti, in quanto l'altezza delle onde generate abbattutesi sulla costa orientale del Giappone ha superato i valori prefissati di progetto, producendo danni ben maggiori rispetto a quanto fosse stato preventivato. Gli effetti dello tsunami sono stati ulteriormente amplificati da fenomeni particolari. L'Autorità di Informazione Geospaziale del Giappone, infatti, ha reso noto che a causa di fenomeni di subsidenza, le zone costiere interessate dal sisma sono state caratterizzate da un abbassamento che ha raggiunto un livello massimo di 1.2 m e che ha provocato un'inondazione immediata. Dopo il passaggio dell'onda di tsunami, quindi, uno strato rilevante d'acqua ha ricoperto queste zone per parecchio tempo, rendendo i soccorsi estremamente difficili (Figura 2). Fenomeni di subsidenza di questo tipo sono molto comuni soprattutto nel

caso di terremoti di rilevante intensità ed importanza; esempi significativi sono gli eventi di Kohchi (Giappone, 1946), Valdivia (Cile, 1960), Alaska (1964) e Izmit (Turchia, 1999).

In generale, lo scuotimento del suolo lungo le coste della parte orientale del territorio giapponese è stato caratterizzato da due forme d'onda che si sono sovrapposte mediante combinazioni differenti a seconda della zona geografica e da durate in certi casi anche superiori ai 120 secondi. Le due forme d'onda, o in alternativa i loro effetti, si possono notare in Figura 3 ed in Figura 5. In particolare, nella prima figura, dove sono rappresentate le distribuzioni delle componenti orizzontali di accelerazione e velocità di picco al suolo, si possono distinguere due sottodistribuzioni importanti ubicate rispettivamente nella zona della Prefettura di Miyagi (approssimativamente nell'intorno delle coordinate N38.5, E141.0) e delle Prefetture di Tochigi e Ibaraki (N36.5, E140.5), a testimonianza del fatto che il meccanismo di rottura generato dal sisma non si è propagato in modo uniforme, semplicemente attenuandosi dalla costa verso l'interno (cioè allontanandosi dall'epicentro) ma è stato caratterizzato da scuotimenti radiali importanti.

In Figura 5, invece, sono raffigurate le componenti Nord-Sud, Est-Ovest e verticale degli accelerogrammi registrati da due stazioni della rete K-NET posizionate nelle vicinanze di Ishinomaki e di Sendai. In entrambi i casi è evidente come il terremoto sia stato in realtà caratterizzato dalla sovrapposizione di due eventi principali, i quali sono alla base delle sopraccitate irregola-



Figura 2  
Fenomeno di subsidenza presso Natori City, nella zona a sud di Sendai (Prefettura di Miyagi) (Fotografia di Dalken Suzuki, studente presso l'Università di Tokyo).

Figura 3  
Distribuzione dell'accelerazione e della velocità di picco al suolo, rispettivamente a sinistra e a destra (Fonte Nied - <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/quake>).

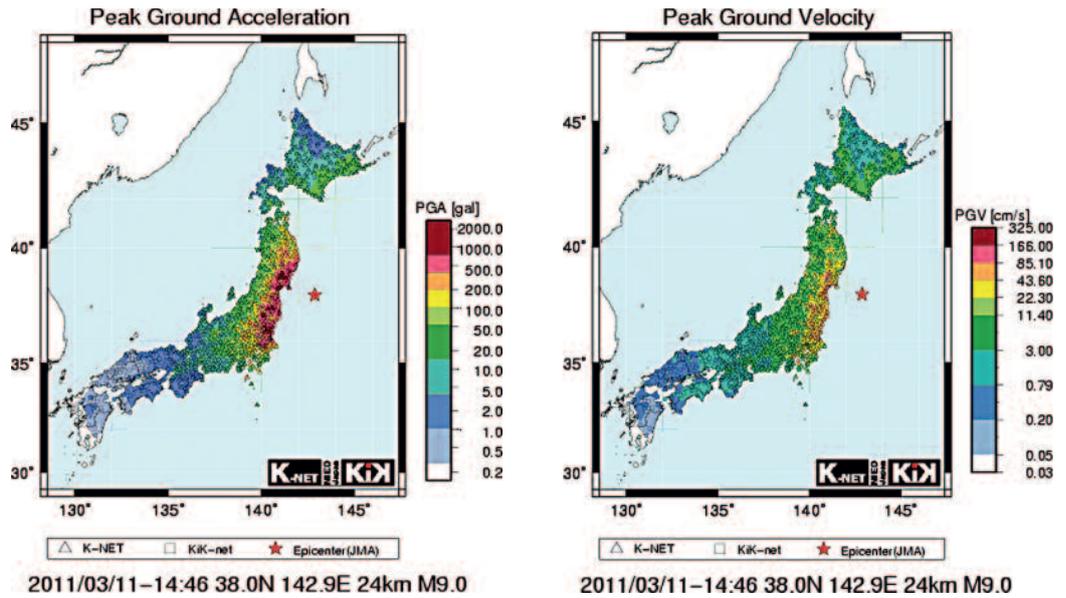


Figura 4  
Ubicazione delle stazioni K-NET MYG10 e MYG13, rispettivamente nelle vicinanze di Sendai e di Ishinomaki.



rità nella diffusione del meccanismo sorgente. Mentre nella zona di Sendai e Ishinomaki si è registrata una situazione intermedia in cui le due fasi di scuotimento sono ben distinte ed entrambi importanti, più in generale la situazione è stata caratterizzata dalla predominanza della prima fase nelle zone settentrionali, fino ad un progressivo predominio della seconda fase procedendo in direzione sud. In ogni caso, indipendentemente dal numero di eventi, lo scuotimento complessivo è stato carat-

terizzato da una lunga durata, la qual cosa ha prodotto due effetti molto importanti che non possono essere trascurati: il primo è un elevato numero di cicli imposti dall'azione sismica rispetto ai casi di durata minore, il secondo è invece legato ai fenomeni di liquefazione del suolo, che in questo caso hanno prodotto effetti maggiormente seri e problematici. Nelle Figure 6 e 7 sono rappresentati i confronti fra gli spettri in pseudo-accellerazione ed in spostamento delle già citate stazioni MYG10 e

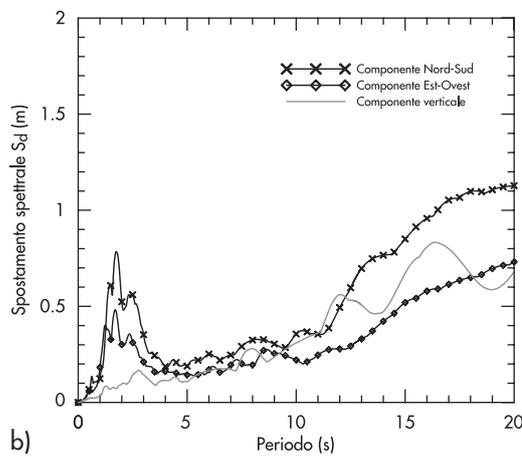
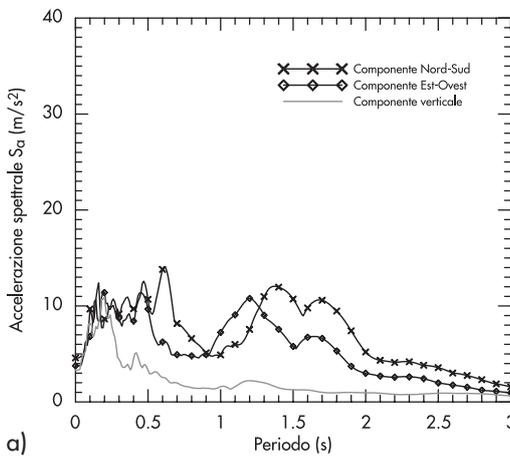
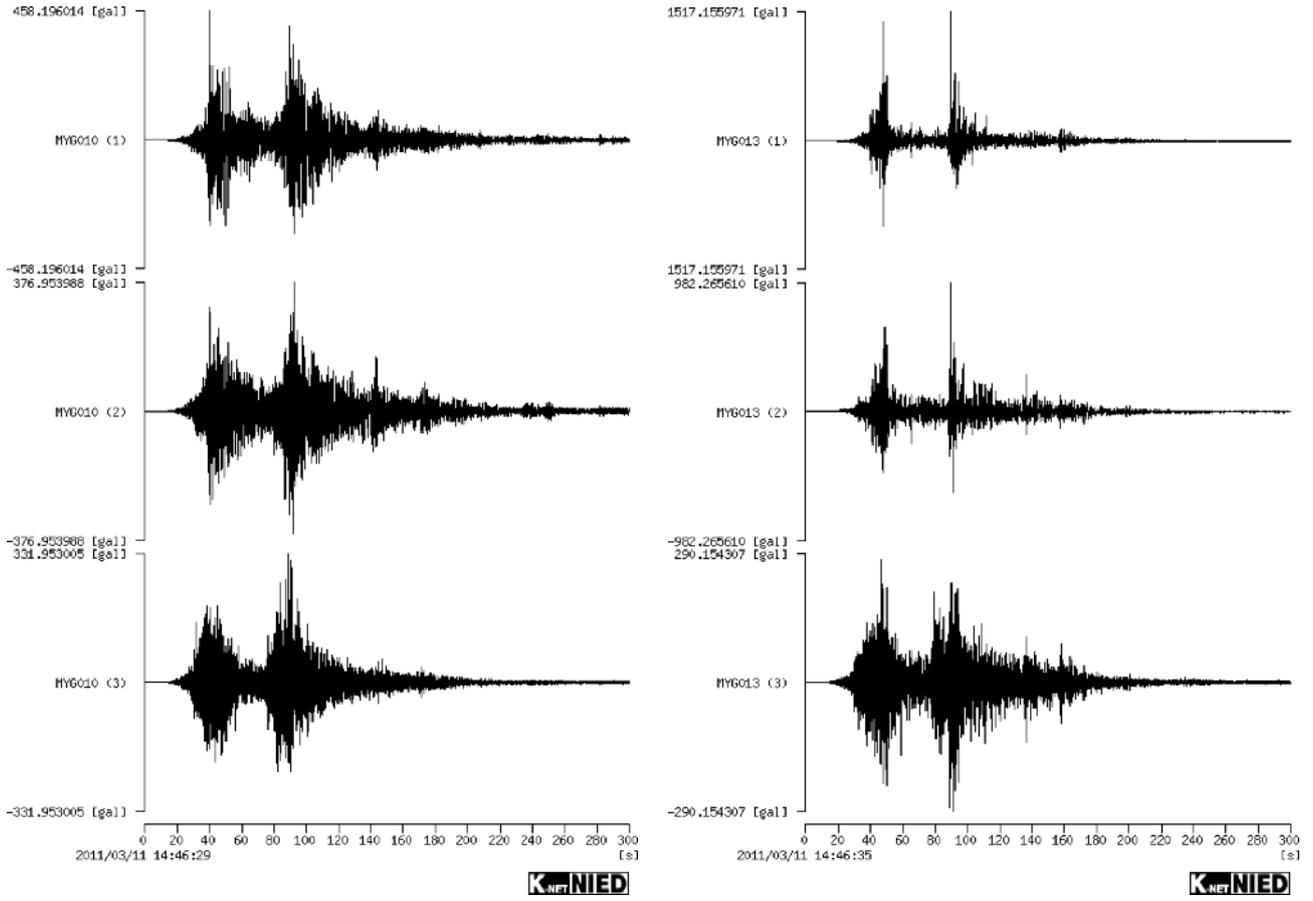


Figura 5  
Accelerogrammi (dall'alto verso il basso: componenti orizzontali Nord-Sud ed Est-Ovest e componente verticale) registrati dalla stazione K-NET di Ishinomaki MYG010 (a sinistra) e di Sendai MYG013 (a destra) - 1 Gal (Galileo nel sistema cgs) = 1 cm/s<sup>2</sup> - Fonte NIED (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>)

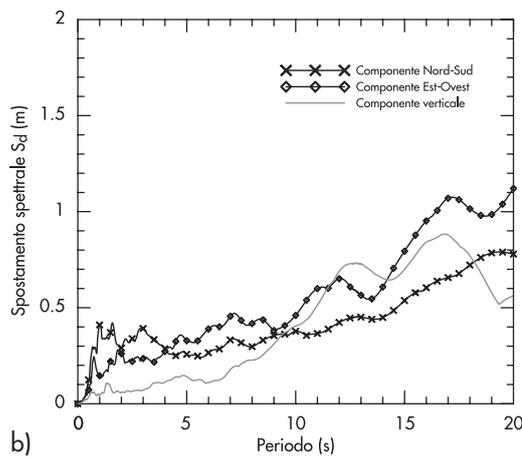
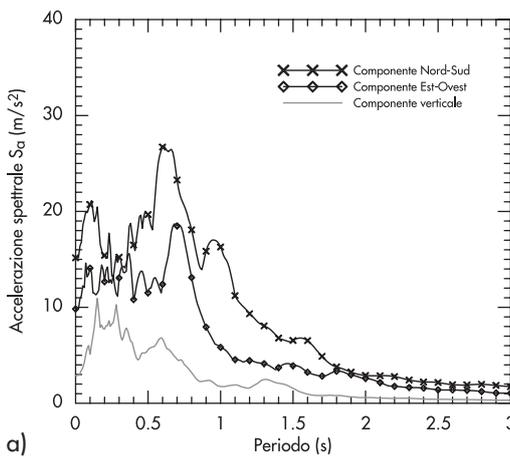


Figura 6  
Pseudo-accelerazione (a) e spostamento spettrale (b) ricavati dallo scuotimento registrato dalla stazione K-NET di Ishinomaki (MYG010) per uno smorzamento pari a 5%.

Figura 7: Pseudo-accelerazione (a) e spostamento spettrale (b) ricavati dallo scuotimento registrato dalla stazione K-NET di Sendai (MYG013) per uno smorzamento pari a 5%.

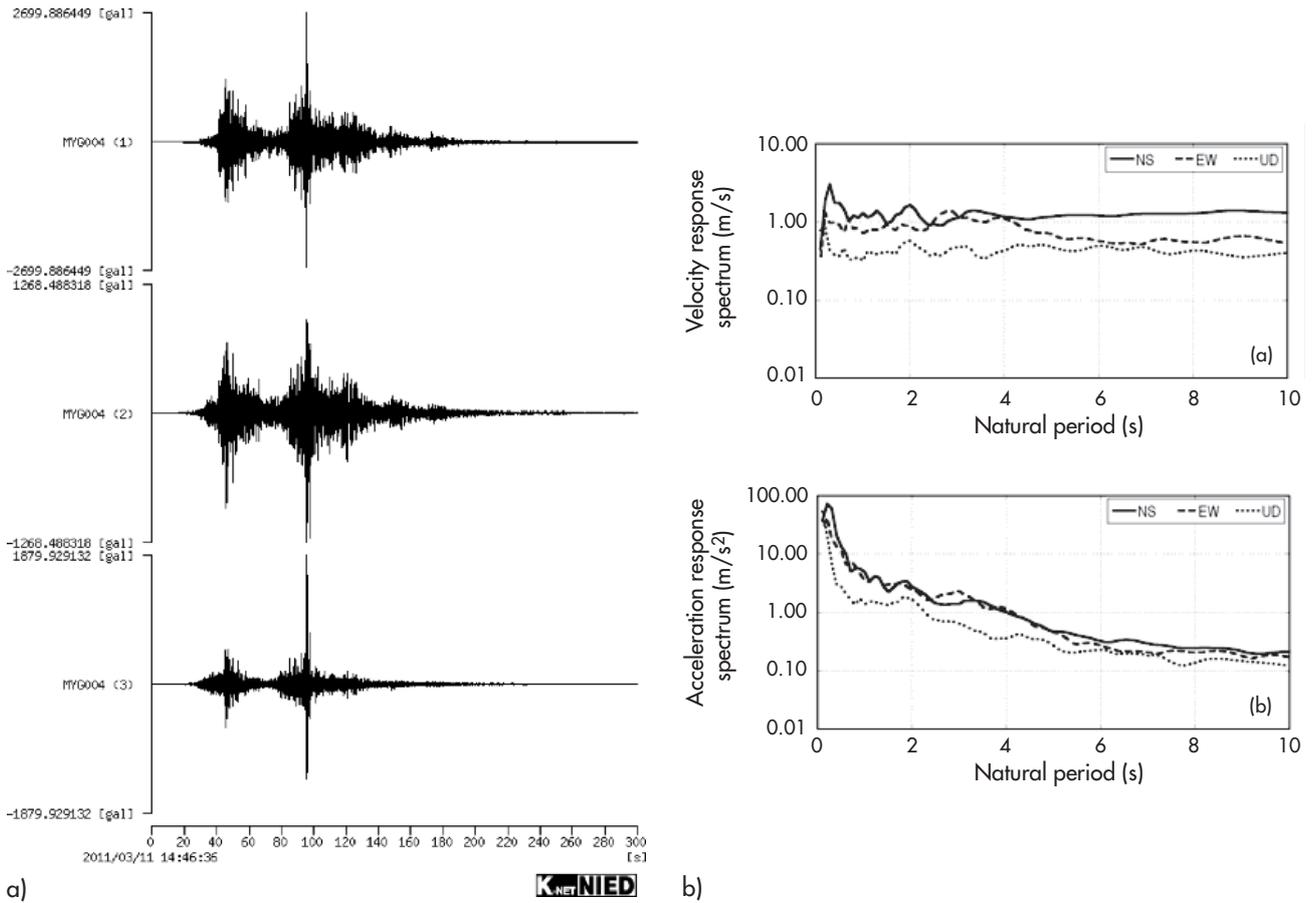


Figura 8  
Registrazione dello scuotimento al suolo della stazione K-NET MYG004 presso Tsukidate e successive elaborazioni: (a) componenti Nord-Sud, Est-Ovest e verticale (NIED, 2011) - 1 Gal [Galileo nel sistema cgs] = 1 cm/s<sup>2</sup>; (b) spettri in accelerazione ed in spostamento (Takewaki, 2011).

MYG13, rispettivamente vicino ad Ishinomaki e Sendai (si veda a tal proposito la cartina di Figura 4), entrambe appartenenti alla rete K-NET e distanti fra loro circa 50 km. Si può notare come nei pressi di Ishinomaki la massima accelerazione orizzontale sia dell'ordine di 1.5 g, valore molto rilevante, ma comunque basso se paragonato alla corrispondente accelerazione massima registrata vicino a Sendai, dell'ordine di 2.7 g. Per contro, i livelli delle domande di spostamento, se ci si limita ad esaminare i valori più bassi di periodo (< 4 sec), sono pari a 0.78 m contro 0.42 m. È interessante osservare che accelerazioni di picco al suolo estremamente rilevanti, superiori a 2.5 g, sono state registrate a Tsukidate (Figura 8), Kurihara City e nella Prefettura di Myiagi, dove sono situate anche le città di Sendai e Ishinomaki (NIED, 2011) e che sembra quindi lecito attendersi in tali zone pseudo-accelerazioni spettrali estremamente alte (amplificate rispetto al valore di 2.5 g). Una spiegazione per cui in

un simile contesto lo scuotimento sismico non ha provocato danni devastanti è da ricercare nel fatto che il periodo predominante del moto al suolo sembra essere stato inferiore a 0.3 s (si vedano per esempio gli spettri associati allo scuotimento registrato a Tsukidate, Figura 8b) e quindi non in grado di ripercuotersi in modo considerevole sulle strutture.

Per quanto riguarda l'area della città di Tokyo, si conferma l'entità rilevante dello scuotimento, che nonostante la notevole distanza dall'epicentro (circa 370 km) ha fatto riscontrare picchi di pseudo-accelerazione spettrale intorno a 0.8 g su periodi bassi (< 0.35 s, si veda il precedente dossier). Questa particolare situazione caratterizzata da elevata energia sui lunghissimi periodi, spiegabile in base al fatto che le alte frequenze subiscono un'attenuazione maggiore con la distanza, non ha esentato totalmente l'area di Tokyo dal danneggiamento, anche se occorre precisare che questo si è manifestato in misura decisamente modesta.

## 2. Danneggiamento

Il sisma che lo scorso 11 marzo ha colpito la costa orientale giapponese ed ha provocato danni di differente tipologia ha interessato un'area avente

estensione in direzione Nord-Sud di circa 500 km. Nel periodo corrispondente all'incirca alla metà di aprile, cioè poco oltre un mese dall'evento principale, la quantificazione precisa del

numero di vittime non era ancora possibile, soprattutto a causa degli effetti dello tsunami, che oltre ad aver provocato un elevato numero di vittime e dispersi, ne ha reso difficoltosa la ricerca in mezzo alla incredibile quantità di macerie trasportate. Sempre in tale periodo furono stimate circa 25000 vittime ed un totale di 26.7 milioni di tonnellate di macerie.

I principali danni indotti direttamente o indirettamente dal sisma sono inquadrabili come: danneggiamento dovuto allo scuotimento, danneggiamento provocato dall'onda di tsunami, problemi di liquefazione di terreni sabbiosi, problemi di instabilità di pendii ed argini. Questi argomenti sono riassunti nelle pagine seguenti.

## 2.1 Danneggiamento dovuto allo scuotimento

### 2.1.1 Sendai e dintorni

Come già evidenziato, i danni dovuti direttamente allo scuotimento, sempre e comunque legati anche alle caratteristiche delle tipologie strutturali interessate, sono distribuiti non uniformemente e possono suscitare interpretazioni contrastanti. Nella città di Sendai, per esempio, è stato possibile riscontrare

contemporaneamente situazioni di notevole danneggiamento ad edifici e al manto stradale, causato dallo scorrimento relativo del terreno (Figure da 10 a 12) ed assenza di qualunque tipo di danno (Figura 12c), nonostante l'intensità sismica fosse stata classificata pari a 7 secondo la scala della Japan Meteorological Agency (JMA, Figura 9), cioè la massima prevista in tale scala. In particolare, un ulteriore riscontro ritenuto interessante da chi ha effettuato i sopralluoghi riguarda l'assenza di danno di molti edifici in legno. È emblematico a tal proposito la testimonianza di un professionista il cui studio è situato all'interno della sua abitazione di legno (situazione tipica della zona), il quale ha confermato come il livello di scuotimento fosse di notevole entità e di durata considerevole, tanto da risultare molto difficoltoso restare in piedi, ma nonostante questo, la sua casa ed il suo studio non hanno riportato alcun tipo di danno. Ancora una volta, una spiegazione razionale può essere legata al basso valore del periodo predominante degli scuotimenti ( $< 0.3$  s), che non ha eccitato i modi principali di un notevole numero di edifici.

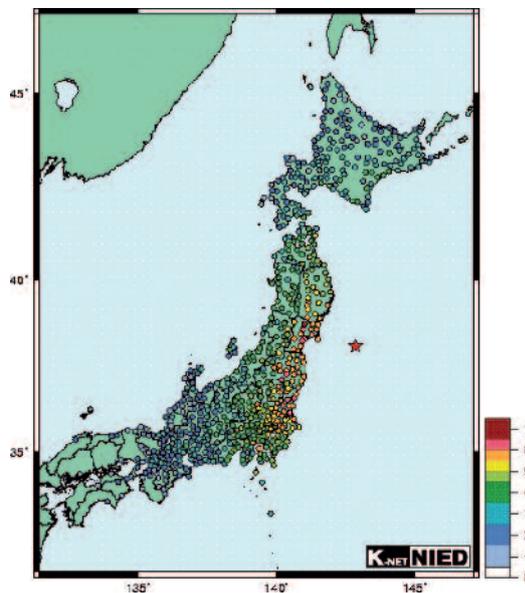


Figura 9  
Distribuzione dell'intensità sismica secondo la scala JMA.

Figura 10  
Oritate 5-chôme -  
Danneggiamento di un edificio (a sinistra) e danneggiamento dei muri di contenimento (al centro e a destra) causati dallo scorrimento del terreno.





Figura 11  
Oritate 5-chôme -  
Cambiamento di direzione  
di una strada  
precedentemente rettilinea  
(a sinistra) e testimonianze  
del danneggiamento del  
manto stradale  
(al centro e a destra).

Figura 12  
Danneggiamento di edifici  
per effetto dello scorrimento  
del terreno a Oritate 5-chôme  
(a sinistra e al centro) ed  
edifici illesi nel centro di  
Sendai (a destra).

Per completezza di informazione, si riportano di seguito le immagini di ulteriori danneggiamenti particolari riscontrati ai viadotti dell'alta velocità situati in altre località appartenenti all'area di Sendai, in particolare lungo la vecchia Strada Nazionale n°4 (Figure da 13 a 15). Le pile dei viadotti della linea Shinkansen di Tohoku situati lungo tale tratto stradale sono state danneggiate, in particolar modo quelle poste all'estremità di ciascuna unità di viadotto. Nelle immagini seguenti è signifi-

ficativo notare i due seguenti aspetti: il confronto in termini di danneggiamento di due viadotti costruiti in epoche differenti ed i meccanismi di danno, in generale per taglio, avvenuti in pile precedentemente rinforzate mediante avvolgimenti di FRP in seguito ad eventi sismici avvenuti in passato. È altrettanto significativo, inoltre, evidenziare il fatto che gli interventi di riparazione degli stessi viadotti siano stati completati in pochissimi giorni dal terremoto.

Figura 13  
Zona di Asuto Nagamachi  
2- chôme: confronto fra il  
viadotto della linea  
Shinkansen costruito nel  
1982 e della Tohoku Line  
costruita nel 2006 (a  
sinistra) e dettaglio di una  
pila ad intervento di  
riparazione completato (a  
destra).



Figura 14  
Zona di Asuto Nagamachi  
2- chôme: rottura della fibra  
di rinforzo alla sommità di  
una pila del viadotto  
dell'alta velocità (a sinistra)  
e rottura per taglio al di  
sotto dello strato di  
fibrorinforzo in un'altra pila  
(a destra).





Figura 15  
Zona di Asuto Nagamachi 2- chôme: lavori di riparazione ultimati mediante iniezione di resina plastica al di sotto del pre-esistente intervento di fibrorinforzo.

**2.1.2 Ulteriori dettagli sui viadotti dell'alta velocità**  
Di seguito sono presentati ulteriori dettagli riguardanti il danneggiamento della linea ad alta velocità Tōhoku Shinkansen, che, come già precisato nel precedente dossier, collega un tratto di circa 675 km, da Tokyo a Aomori. L'obiettivo del sopralluogo ha riguardato in particolare il Viadotto Nakasone n.1, situato nella Prefettura di Iwate Kitakami nelle immediate vicinanze della stazione di registrazione K-NET IWT012, a circa 100 km a nord di Sendai e a 202 km a ovest dall'epicentro del terremoto (Figura 16). La situazione post-sisma di tale viadotto è già stata descritta nel precedente dossier, in particolare sono stati forniti i dettagli di scuotimento del suolo caratterizzato da due fasi ben distinte, gli spettri maggiormente significativi ed una prima descri-

zione dei danni, particolarmente concentrati in corrispondenza della sommità delle pile non più in grado di garantire capacità portante nei confronti dei carichi gravitazionali a causa dell'espulsione del nucleo di calcestruzzo avvenuta in corrispondenza del giunto delle pile stesse. Durante il primo sopralluogo effettuato a poche ore dal sisma, si ipotizzò un meccanismo di collasso a taglio delle pile. Confrontando invece le modalità di danno con quanto riscontrato dopo il terremoto Miyagi-Oki del 2003 e considerando il fatto che le pile in esame non sono state riparate dopo tale evento, ha acquisito maggiore credibilità il fatto che il danneggiamento per taglio sia stato in questo caso accompagnato anche da meccanismi flessionali. In questo paragrafo se ne discutono i motivi.

Figura 16  
Ubicazione del viadotto Nakasone n.1 della linea ad alta velocità Tohoku-Shinkansen, a circa 100 km a nord di Sendai, in corrispondenza della stazione K-NET IWT012 (Fonte Google Maps - www.maps.google.it).



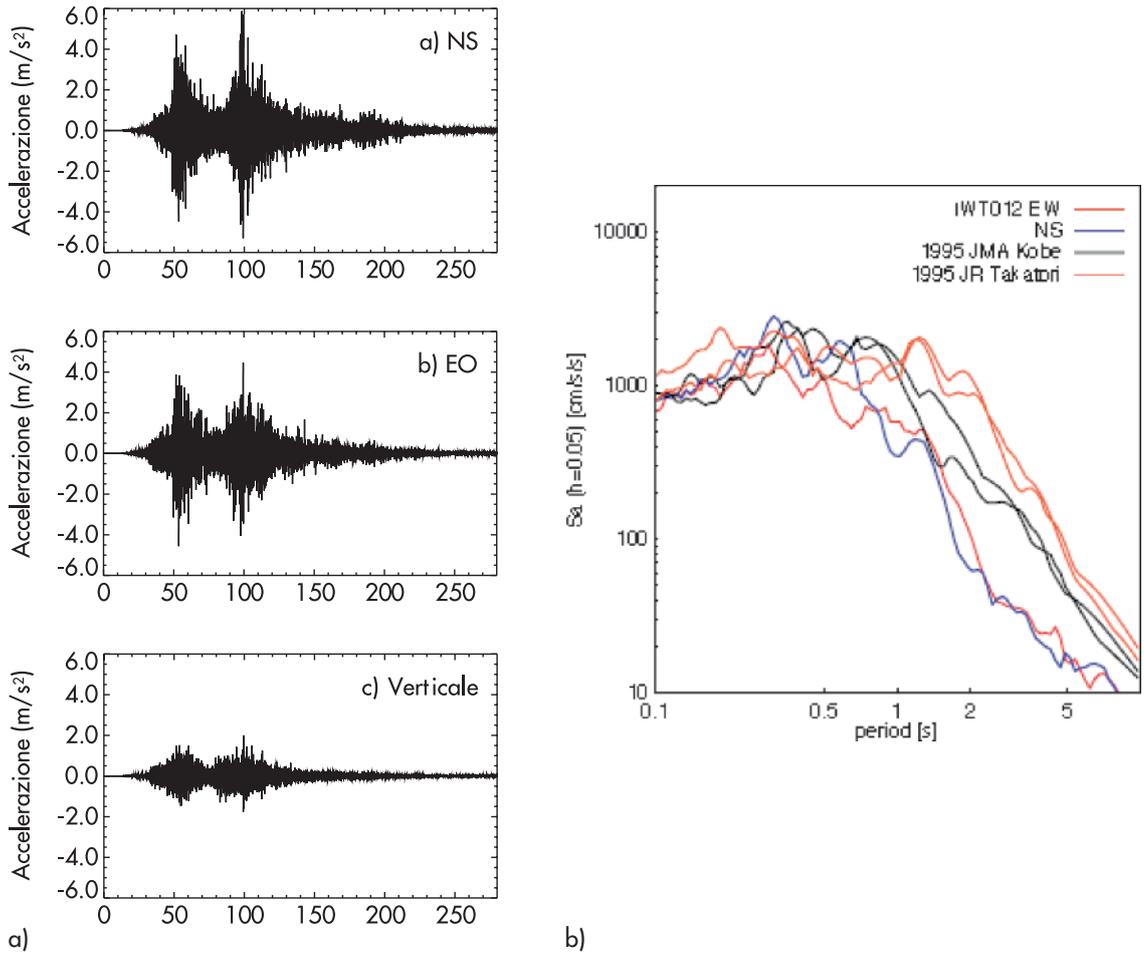


Figura 17  
Registrazione dello scuotimento al suolo della stazione K-NET IWT012 presso Kitakami: (a) componenti Nord-sud, Est-Ovest e verticale (NIED, 2011); (b) componenti orizzontali dello spettro in pseudo-accelerazione confrontate con le registrazioni del 1995 JMA Kobe e JR Takatori (Research Associate Goto).

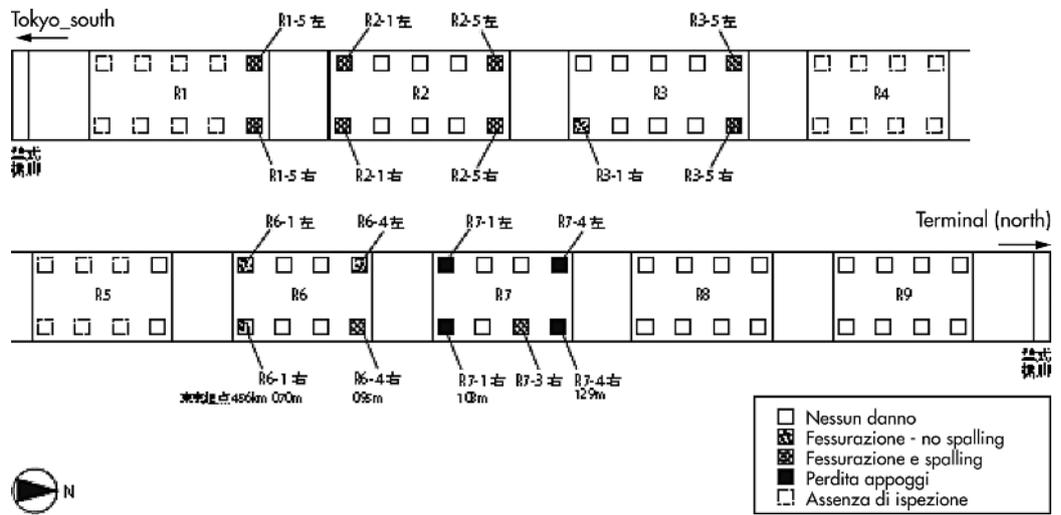


Figura 18  
Identificazione delle pile nelle singole unità di viadotto, da R1 a R9, e identificazione del livello di danneggiamento di ciascuna pila (Takahashi, 2011).

La pila R6-1 del viadotto in questione è situata a 456 km di distanza da Tokyo (estremo sud del viadotto). Le pile sono identificate mediante il codice indicato in Figura 18. In particolare, le unità di viadotto da R1 a R3 (lato rivolto verso Tokyo) sono costituite da 5 coppie di pile, mentre le unità da R4 a R9 (estremo opposto) sono formate da 4 coppie di pile. Il livello di danno indicato in figura è ordinato per gravità

crescente: (1) nessun danno; (2) fessurazione senza raggiungimento dell'espulsione del copriferro; (3) fessure inclinate ed espulsione del copriferro; (4) perdita degli appoggi. L'unica eccezione all'ordine sopraccitato è costituita dal punto (5), in quanto relativo all'assenza di ispezione, giustificata dall'assenza di danno riscontrata da un esame visivo a distanza. Per quanto riguarda le indicazioni di progetto,



si sottolinea che la costruzione del viadotto fu completata nel 1978, come indicato nella targa posta sulla pila R-1. Come specificato nel report precedente, il progetto strutturale fu basato sui seguenti documenti: "Shinkansen Network Structural Design Standards" del 1972 e "Structural Design Standards for Reinforced Concrete, Unreinforced Concrete and Prestressed Concrete Structures" del 1970.

Il viadotto è stato assoggettato ad un'accelerazione di picco al suolo di circa 0.8 g durante la seconda delle due fasi che hanno caratterizzato lo scuotimento (si riporta un solo valore, corrispondente a quello della registrazione di Figura 17, il cui spettro in pseudo-accelerazione è caratterizzato da valori di circa 2.7 g e 2.0 g rispettivamente in corrispondenza di periodi pari a 0.3 s e 0.6 s). Sulle pile R1-5 e quelle dell'unità di viadotto R2 sono visibili tracce di espulsione del copriferro di calcestruzzo (Figura 19), mentre particolar-

mente sulle pile tipo R2 si nota un danneggiamento in corrispondenza della sommità che ha originato fessure inclinate lungo la direzione longitudinale del viadotto. Anche per quanto riguarda le pile R3-1 (Figura 20) e R3-5 (Figura 21) valgono le stesse considerazioni: il fenomeno di espulsione del copriferro è avvenuto in modo più evidente sulle facce est ed ovest ed il danneggiamento ulteriore, dovuto ad un meccanismo di taglio, è associato allo scuotimento lungo l'asse longitudinale del viadotto.

Per quanto riguarda la restante parte del tratto di viadotto esaminato, la pila R7-1, così come la R7-4 hanno subito l'espulsione del nucleo di calcestruzzo in sommità in corrispondenza del giunto della pila stessa, perdendo la capacità resistente nei confronti dei carichi gravitazionali. Alla base delle pile della parte 7 non sono visibili danneggiamenti di tipo flessionale, ma solo fessure inclinate lungo le facce parallele

Figura 19  
Espulsione del copriferro notata sulla pila R1-5 (a sinistra) e su quelle della parte R2 (a destra).

Figura 20  
Espulsione del copriferro e danneggiamento a taglio osservato sulle pile R2-5, R3-1 e R3-5.

Figura 21  
Vista generale della parte R3 (a sinistra) e dettaglio della coppia di pile R3-5 (a destra).



Figura 22  
Piastra identificativa  
indicante l'anno di  
costruzione posta sulla  
pila R7-1 (a sinistra), rottura del  
nucleo in sommità della pila  
R7-4 (al centro) e  
danneggiamento alla base  
della pila R7-3 (a destra).



Figura 23:  
Danneggiamento della  
pila R1 del viadotto  
Odaki n.3  
(a sinistra)  
e della pila R1 del viadotto  
Nakano n.2 (a destra).



all'asse del viadotto (i.e. in direzione nord-sud). A conclusione delle informazioni riportate, si trae il seguente breve bilancio. Il meccanismo di danno è stato simile a quello riscontrato durante il precedente evento del 2003 (Miyagi-Oki Earthquake) ed in particolare i danni si sono concentrati sulla sommità delle pile. Essi sono attribuibili al minore rapporto di taglio (i.e. più bassi valori del rapporto fra altezza della pila e profondità della sezione) delle pile di estremità rispetto a quelle intermedie. Dall'orientamento delle fessure inclinate sulle pile si deduce, inoltre, che il modo predominante si è verificato in direzione nord-sud, lungo l'asse del viadotto. Per questi motivi in un primo momento il collasso è stato associato ad un meccanismo di solo taglio, ma successivamente, grazie al confronto con il danneggiamento riportato dalle pile del viadotto Odaki n. 3 e Nakano n. 2 (Figura 23) per effetto del terremoto del 2003, è stato possibile chiarire meglio la situazione. In tali viadotti le pile di estremità hanno subito un danneggiamento per taglio con fessure diagonali posizionate a circa metà altezza delle pile stesse, meccanismo che in realtà non è stato riscontrato nelle pile del viadotto Nakasone per effetto del terremoto dello scorso marzo, in quanto il danneggiamento è localizzato sulla sommità. I viadotti Odaki e Nakano non sono stati inseriti nel prioritario programma del 2003 di riparazione da parte della Compagnia Ferroviaria Giapponese JR East, per cui si deduce che il criterio di progetto delle pile imponeva che la capacità per meccanismo di taglio

fosse superiore a quella per meccanismo flessionale e quindi tali pile, se ben costruite, non potevano rompersi per taglio. Il meccanismo di collasso delle pile della parte R7 è quindi da intendersi come segue: le fessure flessionali si sono sviluppate rapidamente in corrispondenza del giunto sulla sommità delle pile, gli strati di malta interposti a livello del giunto sono stati espulsi in quanto elementi più deboli, lasciando scoperte le armature che hanno subito notevoli deformazioni a causa dell'elevata forza di taglio imposta, che ha causato infine l'espulsione del nucleo di calcestruzzo in sommità e la conseguente perdita della capacità portante nei confronti dei carichi gravitazionali delle pile di estremità. Anche nelle pile delle zone più interne del viadotto si è riscontrata la perdita della capacità portante, ma con una distribuzione ed un'estensione di tale danneggiamento che varia da zona a zona.

## 2.2 Danneggiamento dovuto allo tsunami

Il maremoto conseguente l'evento sismico, meglio noto con il termine giapponese "tsunami", ha causato i danni più devastanti in assoluto, tanto che per compassione delle vittime e delle rispettive famiglie, gli enti e le unità preposte, quali le società di ingegneria, hanno deciso di posticipare il rilievo dei danni nelle zone colpite, a meno che le condizioni delle strutture coinvolte non rendesse tali operazioni strettamente e rigorosamente improcrastinabili. L'onda di tsunami ha sicuramente ed abbondantemente superato l'altezza di 15 m, rendendo



Figura 24  
Yuriagi, circa 10 km a sud di Sendai, sulla costa: situazione dopo il passaggio dell'onda di tsunami.

Figura 25  
Resti della barriera anti-tsunami nei pressi della foce del fiume Abukuma.

così vane tutte le barriere precedentemente progettate e costruite in base ad un'altezza di progetto ricavata sull'esperienza degli eventi precedenti. La potenza distruttiva di tale onda è stata devastante, tanto da trascinare con sé tutte le strutture presenti nelle aree colpite (Figura 24). In questo paragrafo non si aggiunge altro, poiché, nonostante gli ingenti danni e le numerose vittime, non ci sono ulteriori informazioni da fornire riguardanti il danneggiamento alle singole strutture, che resta il tema principale di questo dossier. Alcune considerazioni, comunque, sorgono spontanee: a) in molte zone costiere pianeggianti come quelle in Figura 24 ed in Figura 25, la popolazione non ha molte possibilità di evacuazione immediata, perfino se un allarme tsunami è attivato con le tempistiche opportune ed a tal proposito si segnala che perfino a Nakaminato Harbor, nella Prefettura di Ibaraki, a 100 km a nord-est di Tokyo ed a 1 m sul livello del mare, l'onda d'acqua ha superato i 4 m di altezza (Towhata et al, 2011); b) dopo il passaggio dell'onda, oltre agli ingenti danni, rimane sul terreno un'impressionante quantitativo di detriti che ostacolano sensibilmente i soccorsi e che per essere rimossi richiedono sforzi notevoli; c) sicuramente i criteri utilizzati per la definizione di "altezza di progetto" di una barriera sono da rivedere, dato che l'altezza dell'onda è stata ben superiore.

### 2.3 Problemi di liquefazione

Il rischio di liquefazione è molto elevato in terreni sabbiosi incoerenti in condizioni sature e relativamente recenti, come riscontrato particolarmente nel caso di isole artificiali create recentemente, letti di fiumi abbandonati e terreni di riporto per condutture di scarico.

Il recente terremoto è stato caratterizzato da problemi di liquefazione che si sono evidenziati in svariate condizioni ambientali. Alcune isole artificiali, per esempio, sono state costruite lungo la costa della baia di Tokyo fin dagli anni '60, la maggior parte delle quali ricavate utilizzando sabbia dragata dal letto dei fiumi. Poiché

il rischio di liquefazione era comunque già ben noto da tempo, le grandi industrie e strutture commerciali sorte nelle zone sopraccitate hanno provveduto a migliorare le prestazioni del terreno, per esempio mediante compattazione o altri metodi, prevenendo così gli effetti del terremoto dello scorso marzo. Fenomeni di liquefazione sono occorsi, invece, in zone residenziali in cui la popolazione non era molto informata del potenziale rischio e per il quale non sono mai state prese particolari precauzioni.

Di seguito si passano in rassegna alcuni esempi di problemi di liquefazione occorsi, inizialmente apparentemente non segnalati dalle squadre che hanno compiuto i primi rilievi. In Urayasu City, sobborgo orientale di Tokyo, ed in particolare in una zona bonificata a partire dagli anni '80, è stato segnalato un fenomeno di liquefazione avvenuto nel sottosuolo in corrispondenza di un impianto sportivo, che si è manifestato in superficie mediante "sandboil" (Figura 26). Sempre nella stessa zona, un centro commerciale non ha subito alcun danneggiamento in quanto realizzato mediante fondazioni su pile, mentre il terreno circostante è stato interessato da un abbassamento in seguito a fenomeni di liquefazione (Figura 27). Nonostante il centro commerciale abbia potuto riprendere l'attività in poche settimane, sicuramente i cedimenti differenziali fra struttura e terreno hanno causato seri danni alle connessioni di impianti e linee essenziali. Un ulteriore particolare danneggiamento è rappresentato in Figura 28, dove i fenomeni di liquefazione hanno provocato una distorsione differenziale del manto stradale. A tal proposito si sottolinea come uno dei problemi più importanti riguardanti la liquefazione è legato al danneggiamento all'interno delle proprietà private, dove per esempio possono riscontrarsi fenomeni di subsidenza e meccanismi di rotazione rigida oppure differenziale degli edifici.

L'attuale mancanza di misure preventive per la mitigazione degli effetti della liquefazione in terreni privati e relative abitazioni, associata ad

Figura 26  
Liquefazione a Urayasu City.



Figura 27  
Subsidenza di 45 cm della superficie del terreno di fronte ad un centro commerciale (Urayasu City).



Figura 28  
Distorsione differenziale della pavimentazione stradale in una zona residenziale di Mihama di Chiba.



Figura 29  
Sollevamento di un tombino e contemporanea subsidenza del terreno con pesante danneggiamento del manto stradale a Sukagawa di Fukushima.



Figura 30  
Distorsione differenziale della pavimentazione stradale in una zona residenziale di Mihama di Chiba.



Figura 31  
Spostamento laterale dovuto a liquefazione di un terrapieno del fiume Naka.



interventi a costi accessibili, sta attraendo notevolmente l'opinione pubblica giapponese (Towhata et al., 2011). Non è da trascurare, fra l'altro, l'importanza rivestita dalle reti essenziali quali acqua e gas, ma anche dalla rete fognaria, che in alcune zone ha riscontrato danneggiamenti molto particolari manifestatisi mediante innalzamento dei tombini e subsidenza del terreno. In Figura 29, per esempio, si può notare una testimonianza di quanto appena descritto, occorsa in un'area nei dintorni di Sukagawa, che fa immediatamente pensare alla necessità di un migliore intervento di compattazione del terreno di riempimento. In Figura 30 si può notare un danneggiamento legato a subsidenza e ad un fenomeno di distorsione di un argine stradale, associati al sollevamento del ciglio stradale ai piedi del pendio. Nelle vicinanze della strada danneggiata è situato un complesso industriale il cui terreno non ha riscontrato problemi dovuti a liquefazione, probabilmente perché le caratteristiche del suolo

sono state migliorate mediante un intervento opportuno.

I danni realmente occorsi sono infinitamente più numerosi degli esempi descritti in questo paragrafo, comunque sufficientemente significativi. Data la grave situazione, associata al fatto che ad inizio giugno solitamente inizia un periodo particolarmente piovoso, già nel mese di aprile ci si rendeva conto che i lavori di riparazione e consolidamento assumevano una priorità decisamente elevata. I corsi di alcuni fiumi in passato sono stati deviati dai meandri originari, a favore di un percorso rettilineo, cosicché i terrapieni realizzati mediante materiale di riporto, essendo ora situati al di sopra di un terreno potenzialmente ad elevata probabilità di liquefazione, possono essere soggetti a deformazioni imposte dall'occorrenza della liquefazione stessa (e.g. spostamento laterale di un terrapieno del fiume Naka, Figura 31). Le manifestazioni in superficie, tipo "sandboil", riscontrate sui terrapieni durante le perlustrazioni, hanno

suggerito che tali terrapieni potessero essere almeno parzialmente incoerenti e comunque saturi o al minimo caratterizzati da un elevato contenuto d'acqua.

#### 2.4 Instabilità di pendii e terrapieni

Problemi legati all'instabilità di pendii e terrapieni sono stati riscontrati in diverse zone, nonostante in molti casi le dimensioni della zona interessata fosse abbastanza circoscritta o addirittura di dimensioni decisamente limitate. Ne è un esempio la Figura 32, che rappresenta la caduta di una parte di una parete rocciosa nei pressi di Ibaraki, a nord di Tokyo, che non ha generato situazione di particolare allarme. Di ben diverse proporzioni e conseguenze è invece la frana di Shirakawa (Prefettura di Fukushima, Figura 33), che si è sviluppata all'interno di uno strato di tufo eroso sovraconsolidato su una lunghissima distanza, tanto da suggerire un possibile angolo d'attrito apparente di 5 gradi, causando 13 vittime (Towhata et al., 2011).

Un altro effetto legato all'instabilità del terreno si è manifestato sotto forma di distorsione di terrapieni che, in molti casi, ha impedito il funzionamento dei trasporti, in particolare della linea ferroviaria dell'alta velocità (Figura 34). Essa è rimasta chiusa per svariate settimane in seguito ai danni subiti, ma fortunatamente non ha fatto registrare vittime durante il terremoto, anzi, è assolutamente degno di nota il fatto che il convoglio ad alta velocità si sia fermato all'insorgere delle prime scosse sismiche, nonostante la

velocità rilevante (superiore a 200 km/h), grazie ad una sofisticata combinazione di tecnologie di sicurezza utilizzate con successo.

Al contrario, invece, sono stati riscontrati molteplici problemi nel caso di riempimenti artificiali di terreni residenziali sviluppati in aree collinari. La Figura 35 mostra, ad esempio, il danneggiamento del versante Midorigaoka, nella zona di Shiroishi, a sud di Sendai, che ha una storia particolare. Esso, infatti, fu sottoposto a fenomeni franosi anche durante il terremoto Miyagiken-Oki del 1978 mentre il riempimento di terra era in fase di realizzazione e proprio in quel periodo gli ingegneri giudicarono impossibile stabilizzare perfettamente il terreno, cosicché, invece di venderlo in quanto zona residenziale, lo declassarono convertendolo in un parco verde. Questa decisione si è dimostrata, col tempo, particolarmente felice, dato che la parte superiore del pendio è franata nuovamente per effetto del terremoto dello scorso marzo, mentre la parte inferiore è rimasta intatta, poiché è stata stabilizzata nei confronti delle infiltrazioni d'acqua sotterranee.

Simili danneggiamenti sono avvenuti anche nell'area più vicina a Sendai: la Figura 36 dimostra come un danneggiamento di questo tipo fosse atteso per effetto di un evento sismico ed infatti questa zona è stata lasciata libera, senza nessuna costruzione, finché si è effettivamente danneggiata a causa del terremoto dello scorso marzo. Decisioni avvedute di questo tipo non sempre, però, sono state prese; nell'area adia-

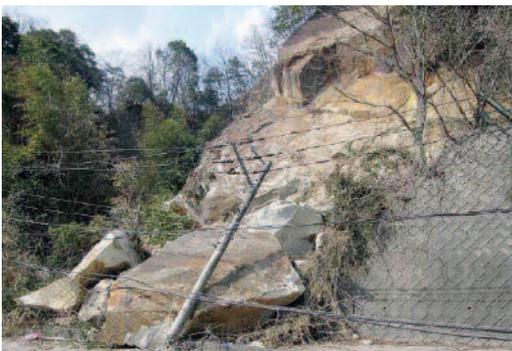


Figura 32  
Caduta di una porzione di parete rocciosa a Ohgo di Ibaraki.

Figura 33  
Rottura di un pendio naturale a Hanokodaira di Shirakawa City.

Figura 34  
Distorsione di un terrapieno ferroviario (Joban Line della Japanese Railway East, vicino a Mito, Ibaraki).

Figura 35  
Danneggiamento del pendio di Midorigaoka Shiroishi, nella Prefettura di Miyagi.

Figura 36  
Collasso per in  
stabilizzazione di un terreno  
residenziale a  
Midorigaoka (Sendai).



Figura 37  
Distorsione della superficie  
del suolo sul fondo di un  
pendio instabile a  
Midorigaoka (Sendai).



cente a quelle appena descritta, infatti, il terreno ha subito una distorsione compressiva sul fondo di un pendio instabile, che ha danneggiato gli edifici situati nella zona (Figura 37).

L'area di Oritate, nella parte occidentale di Sendai, è un'area residenziale relativamente nuova situata in zona collinare ricavata utilizzando come riporto il terreno ricavato dallo sterro di zone adiacenti. In questo caso, le zone sterrate non hanno subito alcun danneggiamento, probabilmente anche grazie al contributo fornito dalla buona qualità delle costruzioni, contrariamente a quelle zone in cui si è ricorsi al riporto. Questa situazione ha contribuito a confermare ulteriormente il già diffuso timore di possibili problemi di stabilità in caso di eventi sismici che coinvolgono terreni residenziali ricavati mediante il riporto di terreni circostanti.

Per concludere l'esame delle problematiche di instabilità dei terreni, si cita il caso delle dighe in terra di Fujinuma, situate nei pressi della città di Sukagawa. Esse sono state costruite fra il 1937 ed il 1949 con un'altezza pari a 17.5 m e le inclinazioni sul lato a valle e su quello dalla parte del bacino rispettivamente pari a 1:2.5 e 1:2.8. La sezione trasversale è costante e probabilmente non sono mai state compattate in modo ottimale, poiché all'epoca non esistevano i macchinari e le attrezzature adatti a tale scopo. La diga n.1 è stata erosa e sbrecciata, tanto da causare un'inondazione di 1.5 milioni di metri cubi d'acqua che si è riversata nella stretta valle sottostante, distruggendo le case di un villaggio e provocando 8 vittime. La diga n.2 è stata danneggiata dalla parte del bacino, ma fortunatamente non ha subito perdite d'acqua.

### 2.5 Danni alle centrali nucleari

Nelle zone altamente sismiche lungo la costa orientale dell'isola di Honshu sono situate numerose centrali nucleari i cui reattori erano pienamente operativi al momento del sisma, con

alcune eccezioni a causa di ispezioni pianificate o per manutenzione. Generalmente i reattori nucleari in attività sono dotati di un sistema di sicurezza che ne governa lo spegnimento all'occorrenza di un terremoto, ma nonostante ciò, nel caso dei reattori della centrale di Fukushima, si sono verificati problemi che hanno condizionato il buon esito delle operazioni di spegnimento, come ampiamente messo in risalto dai media.

La centrale di Fukushima, costruita a fine anni '60 ed operativa sin dai primi anni '70, apparentemente non è stata danneggiata dallo scuotimento sismico dello scorso marzo, bensì dal susseguente tsunami. L'altezza dell'onda di tsunami considerata come riferimento per il progetto, in accordo con l'esperienza maturata in seguito ai terremoti precedenti ed in particolare di quelli del XXI secolo, era pari a 5.7 m, notevolmente inferiore rispetto a quella realmente occorsa, superiore a 14 m. Sembra abbastanza sensato ipotizzare che tale onda abbia probabilmente trascinato con sé i macchinari di pompaggio di emergenza ed inondato il generatore diesel posizionato su di un basamento protetto nei confronti del terremoto, privando così la centrale delle fonti di energia elettrica. Il raffreddamento di emergenza ha operato in condizioni decisamente critiche, con conseguenti problemi che hanno riguardato in particolare le barre di combustibile radioattivo potenzialmente soggette a fusione parziale, come noto, e comunque diversamente distribuiti a seconda del reattore e della zona considerati. Alcuni reattori, per esempio, non erano operativi oppure sono stati spenti e protetti per tempo dalle scosse sismiche.

Prima che avvenisse il terremoto dello scorso marzo, ci si erano posti interrogativi riguardanti la tenuta sismica di una parete a precipizio posta esattamente dietro la centrale, tuttavia fortunatamente nessun problema di questo tipo è stato riscontrato dopo l'evento sismico.

Un dettaglio ingegneristico molto interessante

riguarda le ipotesi adottate in fase di progetto della centrale. L'accelerazione di picco al suolo di progetto (PGA), in particolare, era stata inizialmente posta pari a  $1.74 \text{ m/s}^2$ , ma fu subito innalzata ad un valore prossimo a  $4.5 \text{ m/s}^2$ . Il timore che un'accelerogramma reale potesse avere una PGA maggiore di  $5 \text{ m/s}^2$ , idea abbastanza diffusa all'epoca, fu mitigato dal fatto che il terremoto di progetto si basasse su un appropriato spettro di progetto opportunamente definito, secondo le convinzioni di quegli anni, per cui non sembrava esserci ragione per ipotizzare l'occorrenza di accelerazioni più elevate. Nella realtà, poi, tale timore non solo si è rivelato fondato, ma è stato superato anche dalla consapevolezza che gli effetti degli tsunami potessero causare conseguenze ancora più serie rispetto a quelle legate allo scuotimento. Nel

### 3. Conclusioni

Il devastante terremoto di magnitudo  $M_w$  9.0 che lo scorso 11 marzo ha colpito le coste orientali giapponesi ha provocato una serie incredibilmente vasta di danni di ogni tipo, fra i quali sono da includere i tragici effetti legati allo tsunami ed all'incidente alla centrale nucleare di Fukushima. Non ultime, però, sono da considerare le conseguenze dovute ai fenomeni di liquefazione occorsi a livello del terreno di fondazione di molti edifici pubblici e privati e degli argini dei fiumi.

Apparentemente, sembra che l'opinione pubblica sia stata profondamente colpita non solo dalle enormi conseguenze legate ai problemi principali, a cui è da tempo preparata a causa dei continui terremoti che hanno ripetutamente colpito il Giappone anche nel recente passato, ma soprattutto dalla incredibile moltitudine di problemi minori e dalla loro vastissima distribuzione sul territorio, che ha drammaticamente complicato la gestione dell'emergenza e degli interventi di soccorso.

In altre parole, poiché il meccanismo di attivazione del terremoto è stato caratterizzato da dimensioni molto grandi, gli effetti si sono ripercossi su di un'area molto vasta provocando un'incalcolabile quantità di danni di ogni genere. Per tale motivo l'impatto sociale sull'intera nazione è sembrato essere molto più profondo rispetto ad altri eventi, nonostante le dure esperienze già superate dal popolo Giapponese in passato.

Esaminati nel dettaglio, i singoli danni locali di natura geotecnica non sono sembrati così seri come occorso nel recente passato nel caso di ter-

caso della centrale nucleare di Fukushima, per esempio, le onde di altezza superiore rispetto a quelle di progetto hanno inondato la zona degli impianti elettrici e portato detriti che hanno ostacolato seriamente le attività di emergenza. Nei giorni successivi al terremoto la temperatura nei reattori e nelle installazioni ad essi collegate ha subito un innalzamento tale da provocare, fra l'altro, esplosioni di idrogeno che hanno generato fessure nella struttura oppure incrementato quelle inizialmente formati per effetto dello scuotimento. È ragionevole ipotizzare che questa situazione sia potenzialmente legata ad un aumento di radioattività nell'aria, nel suolo e nell'acqua. Come accaduto in passato in situazioni simili, una soluzione ritenuta fra le più efficaci è stata quella di chiudere la fuoriuscita mediante una colata di calcestruzzo.

remoti di rilevante intensità. In ogni caso il numero estremamente elevato di singoli danni ha ritardato di oltre un mese l'attivazione della tratta ferroviaria diretta tra Tokyo e Sendai. Il trasporto su strada è stato reso molto complesso e difficoltoso, tanto che nelle zone più colpite, come per esempio Sendai, si sono avuti problemi legati alle scorte di cibo, carburante e dei beni necessari per gestire l'emergenza. Le attività industriali nella regione di Tohoku si sono ridotte sostanzialmente causando problemi all'economia locale. Nel mese di aprile, appariva ancora poco chiaro come poter affrontare e risolvere il problema di tali numerosissimi danneggiamenti minori.

Pur non scendendo nel complicato campo del potenziale rischio radioattivo, è bene ricordare che l'elevato livello di piogge annuali ha sicuramente contribuito a mitigarne gli effetti nel terreno a favore della possibile ripresa delle attività agricole. In ogni caso molti altri aspetti sarebbero da esplorare attentamente nel campo geo-ambientale. Durante il primo mese dopo l'incidente ai reattori nucleari, molti abitanti della zona di Tokyo, molto preoccupati dalle possibili conseguenze come per esempio esplosioni incontrollate e catastrofiche, fuggirono in altre zone a ovest o addirittura all'estero. Indipendentemente dalla reale entità e pericolosità delle possibili emissioni radioattive, le conseguenze più gravose, in ogni caso, si sono ripercosse nei confronti di quegli abitanti della zona di Fukushima che sono stati precauzionalmente evacuati in regioni lontane senza conoscere una pianificazione precisa riguardante il loro possibile ritorno a casa.

La rimozione dei detriti, in particolare quelli traspor-

tati dall'onda di tsunami, rappresenta una delle problematiche maggiori. I detriti, infatti, secondo una prima stima ammonterebbero a 26,7 milioni di tonnellate (Towhata, 2011), cifra probabilmente destinata a salire nelle valutazioni definitive.

Il terremoto dello scorso 11 marzo è sicuramente un evento che potrà insegnare molto agli addetti ai lavori. Probabilmente solleverà svariati interrogativi riguardanti due argomenti fondamentali e per certi versi particolari: l'efficacia dell'utilizzo di

spettri a rischio uniforme e la valutazione dell'impatto sociale dovuto ad una moltitudine di danni locali lievi. Per chiarire meglio quest'ultimo concetto, si pensi al fatto che un singolo danno locale di lieve entità non rappresenta un problema, ma se tale danno si presenta in un numero incredibilmente elevato di casi e su di un'area molto vasta come accaduto in Giappone, l'impatto complessivo può essere estremamente negativo e difficile sia da prevedere, sia da gestire.

### Ringraziamenti

Si ringraziano in modo particolare il Dr. Rui Pinho ed il Dr. Alessandro Dazio per il supporto ed i consigli forniti. Si ringrazia inoltre l'Ing. Davide Bellotti per il

lavoro di traduzione di una parte di testo e l'elaborazione di alcune immagini, indispensabile per la stesura di questo dossier.

### Bibliografia

- Ashford S.A., Boulanger R.W., Donahue J.L., and Stewart J.P. (2011) - Geotechnical Quick Report on the Kanto Plain Region during the March 11, 2011, Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER).
- Inayama M. (2011) - Report of Reconnaissance Damage Investigation of Timber Construction in Tochigi Prefecture from the 2011 Tohoku District off the Pacific Coast Earthquake. First Report on March 18, 2011 (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- JMA (1996) - Explanation table of JMA seismic Intensity scale. JMA Leaflet (<http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>).
- Kanakubo T., Yasojima A. (2011) - Report on Building Damage in Northern Ibaraki Prefecture by The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Report released on March 30, 2011. (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- Iida K., Cox D.C., Pararas-Carayannis G. (1967) - Preliminary Catalog of Tsunamis Occurring in the Pacific Ocean. Data Report No. 5. Honolulu: Hawaii Inst.Geophysics, Aug. 1967.
- Motosaka M. (2011) - The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake: Quick Investigation Report on Earthquake Damage on Buildings. First Report on March 12, 2011 (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- NIED (2011) - Sito web del "National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention", <http://www.bosai.go.jp/e/index.html>.
- Sakay Y. (2011) - Damage of Buildings near the NIED K-NET Observation Stations. First Report on March 22, 2011 (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- Takahashi Y. (2011) - Structural Damage of Tohoku Shinkansen Viaducts by the Off the Pacific Tohoku Earthquake. First Report on March 16, 2011 (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- Tanaka R. (2011) - Tohoku Chapter, Architectural Institute of Japan: Quick Reconnaissance Report of East Japan Earthquake Disaster. First Report on March 20, 2011 (In giapponese, traduzione in inglese di S. Otani).
- Towhata I., Goto H., Kazama M., Kiyota T., Nakamura S., Wakamatsu K., Wakai A., Yasuda S., Yoshida N. (2011) - On Gigantic Tohoku Pacific Earthquake in Japan, ISSMGE Bulletin 5(2), 46-66.
- Zschau J., Küppers A.N. (2003) - Early warning systems for natural disaster reduction. Springer.