

Dossier preliminare sul terremoto $M_w = 9.0$ di Tohoku dell'11 marzo 2011

D. Bolognini¹, L. Scandella², F. Bozzoni³, A. Dazio⁴ ■

Nelle ore e nei giorni immediatamente successivi al terremoto di Tohoku, Giappone, la redazione di Progettazione Sismica ha ricevuto numerosi documenti con prime informazioni in merito. Tra i più interessanti quelli che riportano le osservazioni fatte nell'area colpita da colleghi giapponesi. Credendo di fare cosa utile e gradita ai nostri lettori, la redazione ha provveduto a riassumere i contributi ritenuti più significativi nel dossier qui proposto. A questo proposito:

- Si ringraziano i professori Masahiro Inayama (Università di Tokyo), Toschiyuki Kanakubo (Università di Tsukuba), Haruyuki Kitamura (Università di Tokyo), Masaki Maeda (Università di Tohoku), Masato Motosaka (Università di Tohoku), Yuuki Sakai (Università di Tsukuba), Daiki Sato (Università di Tokyo), Yoshikazu Takahashi (Università di Kyoto), Reiji Tanaka (Tohoku Institute of Technology e Presidente della sezione AIJ di Tohoku) e Akira Yasojima (Università di Tsukuba) per aver acconsentito a divulgare le loro osservazioni.
- Si ringrazia il professor Sunshuke Otani dell'Università di Tokyo e docente alla ROSE School di Pavia per la traduzione dei contributi dal giapponese all'inglese.
- 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 processati in via preliminare dai curatori dell'edizione italiana. Si ringrazia quindi il NIED per aver fornito i dati di scuotimento.

1. Introduzione

Venerdì 11 marzo alle ore 14:46 locali (6:46 italiane) il Giappone è stato colpito da un evento sismico tra i più energetici dell'ultimo secolo. La magnitudo stimata, pari a M_w 9.0, lo colloca accanto ad eventi di notevole intensità quali i terremoti di Sumatra del 2004 (M_w 9.1), dell'Alaska nel 1964 (M_w 9.2) e del Cile nel 1960 (M_w 9.5). A titolo di paragone, si pensi che il terremoto che ha colpito L'Aquila nell'aprile 2009 aveva una magnitudo pari a M_w 6.3. Considerando che un punto in più di magnitudo corrisponde a un'energia liberata 31.6 volte superiore, il terremoto di Tohoku è stato circa 11200 volte più energetico di quello dell'Aquila. L'epicentro del terremoto giapponese è stato localizzato al largo della costa orientale di Honshu (la maggiore delle isole giapponesi, Fig. 1) a circa 130 km a est dalla città di Sendai (Prefettura di Miyagi) e 373 km a nord-est di Tokyo (le coordinate geografiche esatte dell'epicentro sono 38.322N, 142.369E). La profon-

dità è stata stimata in circa 24 km.

L'evento sismico è stato anche la causa scatenante di un rilevante maremoto che si è abbattuto sulla costa nord-orientale di Honshu con onde di altezza superiore ai 10 m e che ha provocato un allarme tsunami molto esteso, legato alla possibilità che ulteriori onde anomale potessero colpire le coste del Pacifico di molti altri Stati.

Il terremoto è avvenuto lungo il cosiddetto "anello di fuoco", una regione del Pacifico ad elevatissima sismicità in cui è concentrata la grande maggioranza dei terremoti più energetici di tutto il pianeta, con epicentro in prossimità del margine di subduzione fra la zolla del Pacifico e quella Nord-Americana.

A pochi giorni dal terremoto, l'International Tsunami Information Center (<http://itic.ioc-unesco.org>) riportava testualmente: "il terremoto dell'11 marzo 2011 (M_w 9.0) al largo di Honshu ha generato uno tsunami esteso all'intera regione Pacifica, che ha causato una tremenda devastazione locale. Al 20 Marzo, la

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

² Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ laura.scandella@eucentre.it

³ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ francesca.bozzoni@eucentre.it

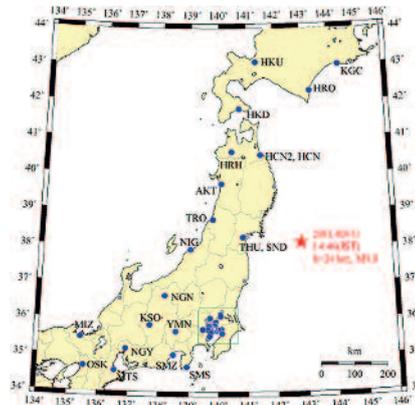
⁴ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ alessandro.dazio@eucentre.it

Japan Fire and Disaster Management Agency segnala 4656 vittime e 8008 dispersi a causa del terremoto e del successivo tsunami. Le onde di altezza maggiore segnalate da testimoni oculari hanno raggiunto i 13 m circa. Questo è il primo tsunami giapponese a causare vittime dal 1993. Lo tsunami più devastante a livello mondiale è stato quello successivo al terremoto di Sumatra (2004, M_w 9.1), caratterizzato da onde di altezza fino a 50 m che hanno causato 230000 vittime." Probabilmente proprio perché diretta testimonianza della capacità devastante di uno tsunami, uno degli aspetti che ha immediatamente colpito l'opinione pubblica e di cui si sono approfonditamente occupati carta stampata e notiziari riguarda la distruzione di Minamisanriku, un paese di 17000 abitanti situato a circa 50 km a nord-est di Sendai (Capoluogo

della Prefettura di Miyagi).

Dopo pochi giorni dall'evento, da un punto di vista puramente ingegneristico sorgono diversi interrogativi circa la correlazione fra lo scuotimento sismico precedente lo tsunami e il danneggiamento strutturale, che, dalle informazioni finora ricavate e riportate nelle pagine successive, non sembra avere provocato danni strutturali di importanza ed estensione paragonabili alla sua notevole intensità (apparentemente la grande maggioranza dei danni sembra essere stata causata dall'onda di tsunami). Questo aspetto sarà sicuramente chiarito nel corso del tempo, in quanto legato ad un numero di parametri molto elevato, non ultimo il fatto che il buon comportamento strutturale è sicuramente in parte dovuto alla progettazione antisismica dei nuovi edifici o al miglioramento di quelli esistenti.

Fig. 1
Epicentro dell'evento M_w 9.0 dell'11 marzo 2011 al largo della costa orientale di Tohoku (THU) e nelle vicinanze di Sendai (SND), a nord di Tokyo (BRI Strong Motion Observation, <http://smo.kenken.go.jp/>).



2. Rilevamento dei danni nella prefettura di Miyagi

La prefettura di Miyagi si colloca nella regione di Tohoku, nella zona nord-est dell'isola Honshu ed ha una popolazione che supera i 2 milioni di abitanti. Il suo capoluogo, la città di Sendai, si trova a meno di 300 km a nord-est di Tokyo e a circa 130 km a ovest rispetto all'epicentro del terremoto. A meno di 24 ore di distanza dall'evento sismico principale, il gruppo di lavoro del Prof. Motosaka (Università di Tohoku) ha effettuato un sopralluogo preliminare nell'intorno della zona di Sendai, in particolare partendo dall'Università di Tohoku e visitando alcuni punti importanti (fra cui edifici pubblici) delle circoscrizioni di Wakabayashi e di Taihaku. Nella figura 2 sono riportati i punti osservati durante il sopralluogo e l'ubicazione delle principali stazioni sismometriche K-NET¹ e KiK-NET² che l'Istituto Nazionale

di Ricerca per le Scienze della Terra e la Prevenzione dei Disastri (NIED, 2011) gestisce sul territorio. In particolare, i luoghi visitati sono: la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Tohoku, l'edificio del municipio di Wakabayashi, la scuola elementare di Minami-Koizumi, la stazione di osservazione del DCRC (Disaster Control Research Center) a Yamato, il distretto di Oroshi, Takasago e Miyagino (tutti situati nella circoscrizione di Wakabayashi), alcuni punti della circoscrizione di Taihaku, il villaggio di Ohira (distretto di Kurokawa) e alcuni punti strategici della città di Osaki.

2.1 Danni nella prefettura di Miyagi rilevati dal gruppo di ricerca del professor Motosaka

Di seguito si riporta in Sezione 2.1.2 la traduzione letterale del rapporto di ricognizione approntato dal professor Motosaka (Motosaka, 2011) nel quale si descrivono i danneggiamenti

¹ <http://www.k-net.bosai.go.jp/>

² <http://www.kik.bosai.go.jp/>

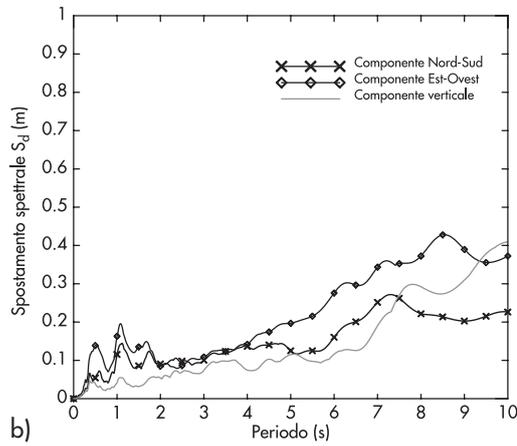
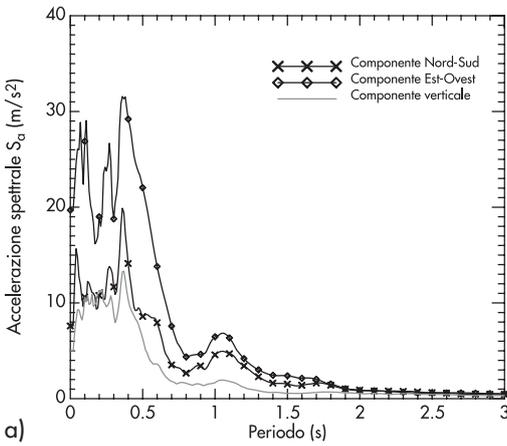


Fig. 2 Ubicazione dei principali punti osservati durante il sopralluogo del 12 e 13 marzo dal gruppo di lavoro del Prof. Motosaka e delle stazioni sismometriche NIED situate nella zona.

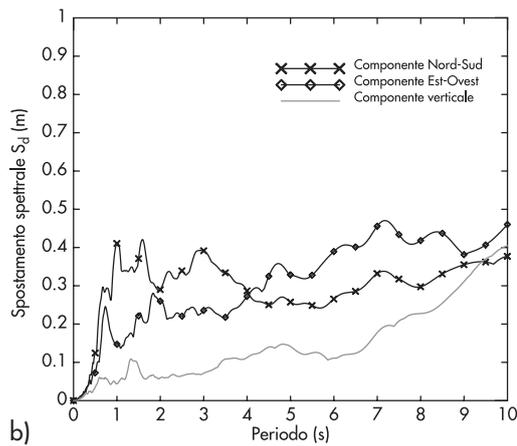
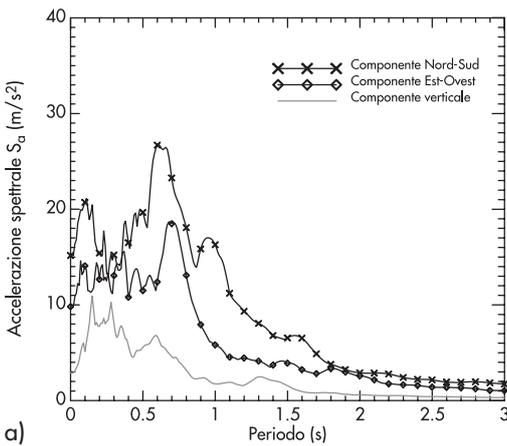


Fig. 3 Pseudo-accelerazione (a) e spostamento spettrale (b) ricavati dallo scuotimento registrato dalla stazione K-NET di Shioyama (MYG012, $D_{epi} = 118$ km).

riscontrati. Le fotografie provengono direttamente dal rapporto, gli spettri in accelerazione e spostamento di Sezione 2.1.1 sono stati aggiunti dalla redazione per fornire un'informazione più completa. La medesima strategia è stata adottata in tutto il dossier.

2.1.1 Valori di scuotimento

Nella prefettura di Miyagi sono presenti diverse

stazioni di misura del NIED. Per motivi di spazio in questa sezione si propongono solamente i dati relativi a due di esse.

La stazione K-NET di Shioyama (MYG012) è situata a Est di Sendai alle coordinate 38.3175N, 141.0193E, H = 1.73 m, quindi a 118 km dall'epicentro. I valori di scuotimento misurati presso questa stazione sono riportati in termini di spettri di risposta in accelerazione e

Fig. 5
Danneggiamento dei muri
esterni.

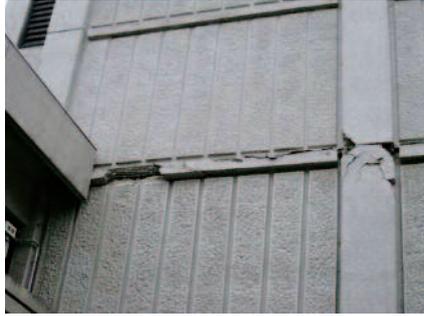


Fig. 6
Danneggiamento del
pilastro d'angolo nord-est e
sud-est.



spostamento in figura 3. L'accelerazione di picco al suolo registrata nelle direzioni Nord-Sud (NS) ed Est-Ovest (EO) è pari a rispettivamente 7.6 e 19.7 m/s^2 (2 g!). L'accelerazione verticale massima è invece pari a 5.0 m/s^2 . Per il movimento orizzontale, l'accelerazione spettrale massima riferita alle direzioni NS ed EO è pari a 31 m/s^2 e la si ha per un periodo di circa 0.4 s mentre valori superiori a 1 g sono stati osservati fino a un periodo di circa 0.7 s. Per quanto riguarda gli spostamenti spettrali si osservano due picchi locali per periodi minori uguali a 1 s con massimi attorno ai 15-20 cm. Per la stazione K-NET di Sendai (MYG013, 38.2663N 140.9293E H = 5.00 m, distanza epicentrale $D_{epi} = 126$ km) gli ordini di grandezza dello scuotimento sono simili e i relativi spettri sono riportati in figura 4. L'accelerazione di picco al suolo per le direzioni NS, EO e verticale sono: 15.2, 9.8 e 2.9 m/s^2 . Rispetto alla stazione MYG012 i massimi di accelerazione spettrale sono minori ma essendo spostati più verso destra sull'asse dei periodi gli spostamenti spettrali che ne risultano per periodi tipici delle strutture civili sono maggiori: in direzione NS per un periodo di 1 s si osservano circa 40 cm di spostamento.

2.1.2 Osservazioni dei danni

Il Dipartimento di Ricerche in Ingegneria ed Ambiente Umano (edificio di nove piani in struttura mista acciaio - calcestruzzo armato) ha subito un danneggiamento rilevante ai quattro pilastri d'angolo al terzo piano. È da tenere presente che in tale edificio è stata misurata un'accelerazione di 1.04 g durante il terremoto Miyagi-ken Oki del 1978, mentre questa volta l'intensità del moto di piano percepita è stata maggiore. L'osservazione del terremoto ai fini dello "structural health monitoring" è effettuata al primo, quinto e nono piano a cura del Disaster Control Research Center (DCRC) dell'Università di Tohoku. Il Building Research Institute (BRI) di Tsukuba ha effettuato le misure dello scuotimento mediante strumentazione SMACMD, recuperando i dati il giorno 16 marzo

dalla strumentazione installata. Tali dati sono attualmente in fase di elaborazione.

Il danneggiamento dei muri perimetrali est è mostrato in figura 5. La sezione di base dei pilastri al terzo piano in corrispondenza dei muri terminali est ed ovest ha subito un danneggiamento estremamente rilevante a causa dell'elevata azione assiale causata dal momento ribaltante. I componenti in acciaio dei pilastri a struttura mista acciaio - calcestruzzo armato, rimanendo scoperti, sono stati soggetti a fenomeni di instabilità in compressione (buckling); allo stesso modo le armature longitudinali sono state instabilizzate o addirittura rotte (Fig. 6). In seguito al pesante danneggiamento delle sezioni di base dei pilastri, l'intero edificio è stato sottoposto a vibrazioni per dondolamento (rocking); sono state riscontrate inoltre nuove fratture sulle barre longitudinali di armatura a causa del presente terremoto, così come vecchie fratture di armatura deteriorata dal precedente terremoto. L'attico dell'Edificio n.1 del Dipartimento di Ingegneria Elettrica è stato danneggiato, in particolare è risultata interrotta l'operatività degli ascensori.

Le informazioni riguardanti il danno degli edifici dell'area di Yamato (distretto di Wakabayashi) sono stati ottenuti direttamente presso il Centro Coordinazione Emergenze del municipio di Wakabayashi. La torre sporgente di un edificio condominiale a 6 piani in calcestruzzo armato ha subito un danneggiamento rimanendo inclinata rispetto alla verticale (Fig. 7); in tale edificio non è stato riscontrato nessun altro danneggiamento apprezzabile. Un edificio di tre piani in calcestruzzo armato ha fatto riscontrare il collasso del primo piano a Yamato (Fig. 8), probabilmente a causa di oscillazioni torsionali. Fessure a taglio bi-diagonali (a "X") sono state osservate in muri non strutturali di chiusura dei corridoi dal secondo al nono piano di un edificio di 14 piani in calcestruzzo armato destinato ad uso residenziale completato nel 1981 (Fig. 9); nessun danno è stato invece riscontrato al piano terreno della struttura a pilotis. Le porte non erano posizionate in corrispondenza dei muri non strutturali, in tal



Fig. 7
Torre sporgente inclinata di un edificio condominiale a 6 piani in calcestruzzo armato.



Fig. 8
Collasso del primo piano di un edificio in calcestruzzo armato di tre piani situato a Yamato.



Fig. 9
Edificio in calcestruzzo armato di 14 piani: danneggiamento dei muri non strutturali in corrispondenza dei corridoi.



Fig. 10
Caduta di materiale dalla copertura di un edificio in acciaio a due piani.



Figura 11 Dettaglio dell'ancoraggio metallico del rivestimento crollato.



Fig. 12
Collasso di un edificio in calcestruzzo armato di due piani a Oroshi 2-chome.



Fig. 13
Collasso di un edificio in calcestruzzo armato di tre piani a Oroshi 3-chome.



modo non ci sono stati problemi per la loro apertura. Sempre a Yamato, la finitura esterna di un edificio a due piani in acciaio è crollata (Fig. 10) così come il materiale proveniente dalla copertura, a causa della scarsa cura dei dettagli costruttivi riguardanti la connessione tra la finitura stessa e gli elementi strutturali (Fig. 11). Nell'area di Oroshi (circonscrizione di Wakaba-

yashi), in precedenza severamente danneggiata dal terremoto Miyagi-ken Oki del 1978, è stato segnalato il crollo di due edifici. Il piano terra di un edificio a due piani in calcestruzzo armato è crollato, come mostrato in figura 12; tale edificio è costituito da muri portanti al piano terra ed uno schema a scheletro monolitico (travi e pilastri) resistente a momento flettente al piano

Fig. 14
Caduta dei pannelli di rivestimento in un edificio in acciaio.



Fig. 15
Blocchi di delimitazione in calcestruzzo ribaltati nella zona di Oroshi.



Fig. 16
Edificio condominiale pluripiano a Tagasako.



Fig. 17
Danneggiamento a taglio dei muri non strutturali esterni.



soprastante. Il piano terreno è collassato lungo la direzione debole (fuori piano) dei muri, mentre al piano soprastante sono stati riscontrati problemi di danneggiamento a taglio nei pilastri.

A Oroshi 3-chome parte del pianterreno di un edificio in calcestruzzo armato di tre piani è crollato (Fig. 13); il diametro delle barre longitudinali di armatura è di 19 mm, con armatura trasversale di confinamento da 9 mm disposta ogni 250 mm. Il nucleo dell'edificio ha subito un danneggiamento leggero, ma nonostante questo l'edificio è stato comunque sottoposto ad un importante effetto torsionale causato dalle eccentricità presenti e dal fatto che i pilastri esterni hanno subito un meccanismo fragile a taglio. Si è notato, in generale, la rottura e la caduta di molti rivestimenti esterni nella zona di Oroshi (Fig. 14), così come diversi muri divisorii esterni in calcestruzzo sono caduti per ribaltamento nelle zone attigue a quelle appena descritte (Fig. 15). Gli edifici condominiali pluripiano di rilevante altezza situati a Takasago (Distretto di Miyagino) furono già danneggiati a livello dei pali di fondazione durante il terremoto di Miyagi-ken Oki del 1978. Dei due edifici esaminati, quello situato perpendicolarmente alla Strada Nazionale 45 è stato sottoposto solo ad un lieve danneggiamento, se si eccettua il collasso per meccanismo di taglio dei muri non strutturali (Figg. 16 e 17). Nessun accenno a meccanismi di danneggiamento globale è stato riscontrato. L'edificio che si affaccia sulla Strada Nazionale

45, invece, è stato sottoposto ad un meccanismo di ribaltamento rigido lungo la direzione trasversale, cioè quella più corta, ma solo con un lieve livello di danneggiamento ai piani alti. I muri non strutturali di facciata hanno mostrato una marcata fessurazione a taglio lungo la direzione longitudinale. Un accenno di ribaltamento è stato riscontrato nella direzione trasversale, in particolare con spostamenti laterali residui a livello del quattordicesimo piano stimabili in circa 400 mm tramite una valutazione approssimativa effettuata ad occhio nudo. Il pianterreno è rimasto inclinato, si suppone che anche i pali di fondazione siano stati danneggiati. Sicuramente ulteriori indagini sono necessarie per approfondire la conoscenza del livello di danno; gli stessi residenti, immediatamente consci della situazione, hanno fin da subito monitorato di loro iniziativa l'apertura dei giunti sismici (Fig. 18). Grazie alle informazioni ricavate, si può affermare che il meccanismo di ribaltamento è progredito nei giorni successivi al terremoto, mentre sussistono dubbi circa il tipo e l'entità di danneggiamento nei pali di fondazione. Nella zona del grande centro commerciale Mitsui Outlet e della fiera di Miyagi Yume, il livello delle onde provocate dallo tsunami susseguente al terremoto è arrivato a circa 1 m di altezza, coinvolgendo, fra gli altri edifici, il centro stesso (Figg. 21 e 22). Ciò che è stato possibile osservare direttamente è che le automobili originariamente situate nel parcheggio della struttura sono state



Fig. 18
Giunti sismici di separazione tra i due edifici: danno riscontrato rispettivamente in data 12 marzo (a sinistra) e 15 marzo (a destra).



Fig. 19
Il parcheggio del Mitsui Outlet dopo il terremoto.

Fig. 20
Danneggiamento all'impalcato del primo piano del Mitsui Outlet dopo il terremoto.



Fig. 21
Danneggiamento alla fiera di Miyagi Yume provocato dallo tsunami.

Fig. 22
Automobili trasportate dall'onda dello tsunami all'interno della zona espositiva della fiera di Miyagi Yume.

trasportate dall'onda in altre zone, ma nonostante questo non sono state riscontrate tracce di acqua penetrata all'interno dei negozi. Non sono stati inoltre osservati danneggiamenti strutturali susseguenti allo scuotimento (Figg. 19 e 20). L'area residenziale vicina (Gamoh, Fig. 23) non è stata visitata, in quanto inaccessibile a causa dei pesanti danni provocati dallo tsunami, che localmente in questa zona ha colpito più violentemente rispetto al centro commerciale. Le ulteriori località visitate durante il sopralluogo del giorno 13 marzo, successivo alla prima ispezione effettuata nei dintorni di Sendai sono maggiormente concentrate in una zona centrata a circa 30 km più a nord di Sendai, nel distretto di Kurokawa ed in particolare nel villaggio di Ohira ed alcuni punti strategici della città di Osaki. I commenti presenti nei rapporti di ricognizione sono estremamente sintetici. Se ne riassume di seguito il contenuto, lasciando ampio spazio al

materiale fotografico. La localizzazione geografica dei luoghi coperti dalle fotografie è riportata in figura 2 mentre per indicazioni riguardanti lo scuotimento registrato in zona si faccia riferimento alle figure 3 e 4. Durante il tragitto fra l'Università di Tohoku e l'edificio municipale di Ohira, lungo la Strada Prefetturale 264 e la Strada Nazionale 4 sono state osservate solo cadute di muri non strutturali di tamponamento, ma nessun altro danneggiamento serio alle parti strutturali è stato rilevato. Nella zona dell'edificio municipale del villaggio di Ohira, un'intensità sismica di "6 superiore" secondo la classificazione della Japan Meteorological Agency (JMA) è stata misurata dalla strumentazione appositamente predisposta. Come spiegato più dettagliatamente all'inizio del capitolo 4, l'intensità JMA viene stabilita automaticamente in base alle caratteristiche delle onde sismiche misurate e un valore di "6

Fig. 23
Danneggiamento dell'area
residenziale di Gamoh
dopo lo tsunami.



Fig. 24
Veduta esterna dell'edificio
municipale del Villaggio di
Ohira dopo il terremoto.



Fig. 25
Collasso di strutture a due
piani in legno.



Fig. 26
La scuola elementare
Furukawa No. 1 chiusa per
pericolo di crolli legati ad
aftershocks.



Fig. 27
Collasso di due edifici
destinati ad uso combinato
abitazione - magazzino.



superiore" su una scala di 7 lascerebbe presupporre un danneggiamento importante. In realtà, l'edificio municipale, costituito da una struttura in calcestruzzo armato a due piani (Fig. 24), non ha evidenziato nessuna fessura macroscopica, così come non si segnalano particolari danni nella zona abitata adiacente. Sinteticamente, si segnalano le ulteriori informazioni ricavate durante il tragitto percorso. Fra il

già citato villaggio di Ohira e l'edificio municipale di Osaki City, si sono riscontrati in generale crolli di tamponamenti senza ulteriori particolari danni strutturali, ma anche seri danni per meccanismo di piano debole al primo piano di edifici residenziali in legno (Fig. 25). Nella città di Osaki, in particolare nell'area di Furukawa Mikka e Nanoka vicino all'edificio municipale, un elevato numero di vecchie case

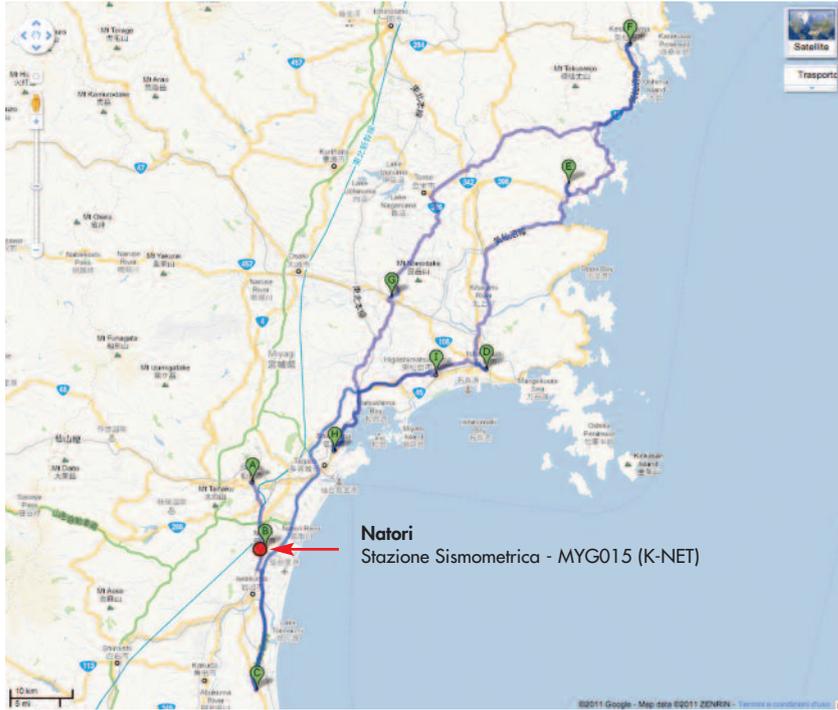


Fig. 28
Area centrata su Sendai visitata durante il sopralluogo del 20 marzo coordinato dal Prof. Tanaka.

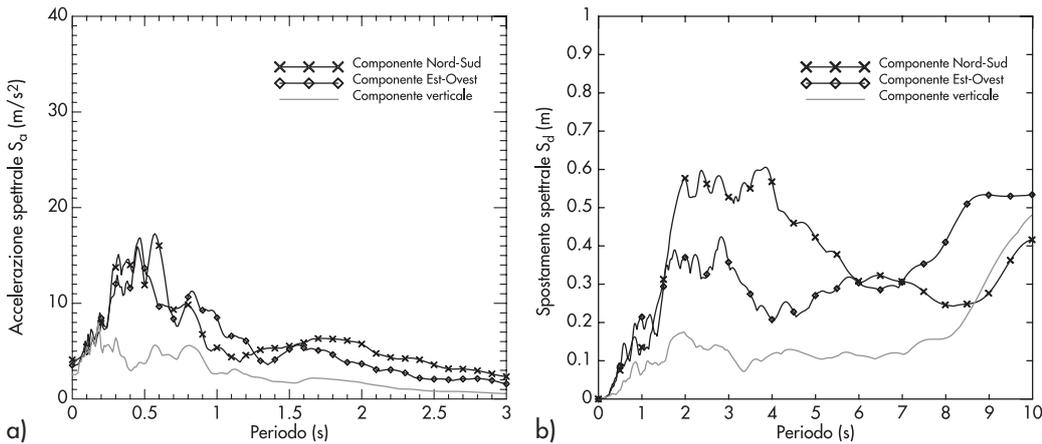


Fig. 29
Spettri di risposta in pseudo-accelerazione (a) e spostamento (b), calcolati in base a dati di scuotimento registrati nei pressi di Natori (Stazione K-NET di Iwamura, MYG015, $D_{epi} = 133$ km).

utilizzate sia come abitazione, sia come negozio o magazzino è collassato (Fig. 27). La scuola elementare Furukawa No.1 (Fig. 26), costituita da una struttura in legno a due piani, è stata immediatamente chiusa per prevenire possibili crolli dovuti alle scosse di assestamento. Anche in questa zona, l'intensità sismica secondo la JMA è pari a "6 superiore". Sempre per quanto riguarda la città di Osaki, la scuola elementare Kaminome, precedentemente pesantemente danneggiata dal terremoto di Iwate-Miyagi Inland del 2008, è stata rinforzata mediante diagonali controventanti in acciaio. Dopo l'attuale terremoto non è stato riscontrato alcun danno aggiuntivo.

2.2 Danni nella prefettura di Miyagi rilevati dal gruppo di ricerca del professor Tanaka

A completamento della preliminare panoramica dei danneggiamenti riscontrati, presentata nella

sezione precedente con particolare riguardo al danno strutturale provocato dallo scuotimento del suolo, effettuata a poche ore di distanza dall'evento sismico stesso, si riportano qui le principali informazioni riguardanti un ulteriore sopralluogo effettuato nel giorno 20 marzo (Tanaka, 2011).

Nell'ambito di tale missione di ricognizione, coordinata dal Prof. Reiji Tanaka (Tohoku Institute of Technology), si sono documentati i danni riscontrati nelle città e villaggi (machi) descritti di seguito. L'area coperta della missione è centrata su Sendai ed è rappresentata in figura 28. Un'osservazione del tutto generale riguarda il fatto che i danni strutturali sono stati causati dallo scuotimento oppure dall'onda di marea dello tsunami. Gli edifici sulla costa sono stati danneggiati prevalentemente dello Tsunami più che dallo scuotimento.

Fig. 30
Un edificio di 37 piani (a)
e uno di 29 (b) situati nel
pressi del centro della città
di Sendai, entrambi non
hanno subito danno a
seguito del sisma.



Fig. 31
Edificio di una banca di
Sendai rimasto illeso.



Fig. 32
Edifici del centro della città
di Sendai rimasti illesi.



Fig. 33
Distretto di Yagiyama presso
Sendai.



2.2.1 Valori di scuotimento

Informazioni in termini di spettri di risposta in accelerazione e spostamento, al momento sono disponibili solo per la zona nelle vicinanze di Natori, pochi km a sud di Sendai. I dati della stazione K-NET di Iwanuma (MYG015, 38.1049N, 140.8699E, H = 3.00 m, distanza epicentrale $D_{epi} = 133$ km) sono riportati in figura 29. L'accelerazione di picco al suolo registrata nelle direzioni Nord-Sud (NS) e Est-Ovest (EO) è pari a rispettivamente 4.1 e 3.5 m/s^2 . L'accelerazione verticale massima è invece pari a 2.5 m/s^2 . Per il movimento orizzontale, l'accelerazione spettrale massima riferita alle direzioni NS e EO è pari a 17 m/s^2 e la si ha per un periodo di 0.6 s mentre valori superiori a 1 g sono stato osservati nella banda di periodi da 0.25 a 0.65 s. Per periodi fino a 2 s gli spostamenti spettrali aumentano in maniera approssimativamente lineare a un valore di circa 60 cm in direzione NS e 40 cm in direzione EO.

2.2.2 Osservazioni dei danni

Sendai

Il distretto commerciale situato presso il centro della città di Sendai non ha praticamente subito danni strutturali, a parte la rottura dei vetri di alcune finestre. La figura 30 mostra un edificio in acciaio di 37 piani provvisto di dispositivi per il controllo delle vibrazioni nonché un edificio in cemento armato di 29 piani isolato alla base. In entrambi i casi non si sono riscontrati danni strutturali. L'operatività degli ascensori e l'erogazione delle utenze (elettricità, acqua) è stata ripresa due giorni dopo il sisma. La figura 31 mostra l'edificio di una banca che non ha subito danno alcuno. L'osservazione che i danni dovuti allo scuotimento sono stati assai limitati è confermata dalla figura 32 che riporta una serie di edifici di Sendai rimasti illesi.

La fotografia di figura 33 scattata nel distretto di Yagiyama nella zona di Sendai mostra come anche nelle aree residenziali non si siano riscontrati



Fig. 34
Pareti in blocchi di calcestruzzo che non hanno subito danni (Sendai).



Fig. 35
Ribaltamento di una parete in blocchi di tufo (Sendai).

trati danni dovuti allo scuotimento sismico. Durante il terremoto Miyagi-ken Oki del 1978, alcune pareti costruite con blocchi di cemento crollarono uccidendo bambini in età scolare. A seguito della tragedia, il governo municipale di Sendai ha promosso il miglioramento sismico di questo tipo di pareti e il fatto che non si siano riscontrati danni significativi a pareti in blocchi di calcestruzzo (Fig. 34) dimostra l'efficacia del programma di miglioramento attuato. D'altra parte il sisma ha però causato danni a pareti costruite in tufo, chiamate anche Oya-ishi, dove in più occasioni si è osservato il distacco e la caduta di blocchi (Fig. 35).

Natori

La città di Natori è situata a sud di Sendai. Danni strutturali minimi sono stati riscontrati nella parte centrale della città. La regione costiera nella zona dell'autostrada Sendai-Toubu è stata parti-

colarmente soggetta allo tsunami e i danni sono qui più severi.

Iwanuma

La città di Iwanuma è situata a sud di Natori. Danni strutturali minimi sono stati riscontrati nella parte centrale della città, mentre la regione costiera è stata soggetta allo tsunami. Presso un ospedale della città l'onda ha raggiunto un'altezza corrispondente al terzo piano (attorno ai 7 m), al momento non esistono foto a tal proposito.

Yamamoto-machi

Il villaggio di Yamamoto-machi si trova a sud della città di Iwanuma. Nella parte centrale del villaggio sono stati riscontrati alcuni danni. La regione che si estende dalla costa fino a 3 km dalla Strada Nazionale 6 è stata toccata dallo tsunami e i relativi danni sono documentati dalle figure 36 e 37.



Fig. 36
Detriti trasportati nei pressi della Strada Nazionale 6.



Fig. 37
Detriti nei pressi di Yamamoto-machi.

Shiogama

La città di Shiogama è situata a nord di Sendai. Gli edifici posizionati in collina sono rimasti praticamente illesi mentre i danni aumentano quando ci si avvicina alla costa. Le figure 38 e 39 mostrano due aree distinte di Shiogama: la prima danneggiata, la seconda praticamente senza danni.

Isihnomaki

La città di Isihnomaki è situata a nord-est di

Shiogama e ha subito seri danni a seguito dell'onda di tsunami come documentato dalle figure 40 e 41.

Motoyoshi-machi

Il villaggio di Motoyoshi-machi è situato a nord della città di Isihnomaki. Il team di ricognizione è partito da Sendai in direzione della città di Kesenuma seguendo le Strade Nazionali 4 e 346 e passando per Motoyoshi-machi, che ha raggiunto

Fig. 38
Area della città di
Shiogama con danni dovuti
al sisma.



Fig. 39
Area della città di
Shiogama senza danni
dovuti al sisma.



Fig. 40
Chuo 3-chome nei pressi di
Manga-kan.



Fig. 41
Quartiere commerciale di
Tachimachi.



dopo 3 ore. Prima di giungere a Motoyoshi-machi il team ha visitato Tajiri-machi e Semine-machi dove ha riscontrato solamente danni minimi. Qualche danno in più è stato osservato a Sanuma-machi. Tutti questi villaggi si trovano nell'entroterra lontano dalla costa per cui i danni osservati sono stati causati dallo scuotimento. A Motoyoshi-machi sia la scuola sia l'edificio del municipio, entrambi in collina, non hanno riportato danni. Le figure 42 e 43 mostrano invece come vicino alla costa l'onda di tsunami abbia causato danni ingentissimi. Si stima che lungo la costa di Ohtani, l'onda abbia raggiunto un'altezza di 20-30 m (n.d.r.: altezza riportata nel rapporto di ricognizione tradotto. Questo valore è molto più elevato di quelli incontrati in altri documenti e dovrà quindi venir confermato).

Kesenuma

La città di Kesenuma a nord di Motoyoshi-machi è raggiungibile tramite la Strada Nazionale 45. Anche qui gli edifici in collina hanno subito solamente danni lievi, mentre quelli in pianura hanno subito gravi danni a seguito dello tsunami. Le figure 44 e 45 mostrano i danni subiti dal molo turistico dell'"Ocean view Building"; l'onda ha raggiunto il terzo piano dell'edificio in calcestruzzo. Ciò indica che l'altezza dell'onda deve aver raggiunto i 7 metri.

L'area lungo la linea ferroviaria di Kesenuma ha subito danni a seguito dell'erosione del fiume Ohkawa causata dall'onda di tsunami. Il municipio di Kesenuma essendo situato in collina non ha subito danni così come il villaggio di Mikkamachi.

Fig. 42
Danni dovuti all'onda di
tsunami a Motoyoshi-machi.



Fig. 43
Un motel vicino alla
spiaggia, danneggiato
severamente dall'onda di
tsunami a Motoyoshi-machi.





Fig. 44
Molo turistico dell'Ocean view Building (Kasenumma).



Fig. 45
Danni dovuti all'onda di Tsunami al primo piano dell'edificio (Kasenumma).

3. Rilevamento dei danni nella prefettura di Tochigi

Un'ulteriore missione di ricognizione effettuata il 16 e 17 marzo è stata coordinata dal Prof. Masahiro Inayama dell'Università di Tokyo. Il sopralluogo ha riguardato fundamentalmente quattro aree principali: la città di Nasu Karasuyama ed i villaggi Ichigai-machi, Haga-machi e Takanesawa-machi.

La già citata intensità sismica JMA è stata pari a "6 superiore" a Nabekake, Nasu Shiobara City, Terako, Nasu-machi, Yutsugami e Ohtahara City. Tale valore è sceso a "6 inferiore" a Moto-machi e Ohtahara City. Le aree ispezionate sono parte della Prefettura di Tochigi, caratterizzata da una popolazione di circa 2 milioni di abitanti, situata nella regione di Kanto (parte centrale dell'isola di Honsho) ed avente capo-

luogo Utsunomiya. Tale Prefettura ha la particolarità di trovarsi vicino anche alla miniera di tufo di Ohya, nelle cui vicinanze la muratura di tufo è comunemente utilizzata per magazzini e muri perimetrali di lotti residenziali.

Al momento la redazione non dispone di informazioni riguardanti lo scuotimento provenienti da registrazioni di stazioni situate nelle zone ispezionate.

Poiché il rapporto di ricognizione (Inayama, 2011) è quasi esclusivamente fotografico, si riporta di seguito un riassunto delle immagini più significative (Figg. da 46 a 51).

Un ulteriore gruppo investigativo condotto dal Dr. Tomoaki Souma ha esplorato negli stessi giorni le zone di Nasu-machi, Nasu Shiobara City, Ohtahara City e Utsunomiya City. In particolare a Nasu-machi sono stati rilevati molti danni concen-



Fig. 46
Collasso delle fondazioni alle realizzate mediante muratura in tufo di Ohya.



Fig. 47
Collasso delle fondazioni alle realizzate mediante muratura in tufo di Ohya (2).



Fig. 48
Collasso delle fondazioni alle realizzate mediante muratura in tufo di Ohya della stazione di polizia.



Fig. 49
Rottura della saldatura fra la sezione dei pilastri e l'implicato.

Fig. 50
Collasso di un tempio.



Fig. 51
Caduta della finitura esterna
in fango dalla parete di un
piccolo edificio
tradizionale.



trati nel distretto di Nishikubo su edifici pubblici (Fig. 52). Nella città di Nasu Shiobara sono da segnalare molti danneggiamenti; in particolare nel distretto di Terako, i diffusi cottage di campagna realizzati mediante struttura in legno sono stati pesantemente danneggiati (Fig. 53). Nella

città di Ohtahara l'edificio del Comune, una struttura in calcestruzzo armato costruita alla fine degli anni '60, è stata severamente danneggiata (Fig. 54). Anche nella città di Utsonomiya sono da segnalare molti danni, ma allo stato attuale una ricognizione non è stata ancora completata.

Fig. 52
Danneggiamento nelle
colonne di un edificio di
una scuola elementare
Nasu-machi.



Fig. 53
Danneggiamento di un
cottage di campagna a
Terako.



Fig. 54
Rottura dei vetri delle
finestre e fessurazione a
taglio dell'edificio
Comunale di Ohtahara.



4. Rilevamento dei danni nella prefettura di Ibaraki

La prefettura di Ibaraki è situata nella regione di Kanto circa 70 km a Nord-Est di Tokyo e 300 km a Sud-Ovest dall'epicentro. Sul territorio della prefettura l'Istituto Nazionale di Ricerca per le Scienze della Terra e la Prevenzione dei Disastri (NIED, 2011) ha installato diversi strumenti delle sue reti sismometriche K-NET e KiK-NET. Nella stessa regione sono inoltre presenti sia sismometri sia misuratori d'intensità sismica dell'Agenzia Meteorologica Giapponese (JMA) descritti in seguito. Nei giorni successivi al terremoto, più precisamente il 16 e il 19 marzo 2011, il professor Yuuki Sakai dell'Università di Tsukuba ha condotto una missione di ricognizione con lo scopo di documentare i danni osservabili nelle vicinanze delle stazioni di misura in modo da poter correlare scuotimento del terreno e danneggiamento subito dalle strutture. Le quattro stazioni di misura considerate sono indicate in figura 55; si tratta di:

1. Stazione K-NET presso Hakota;
2. Stazione KiK-NET presso Iwase;
3. Stazione sismometrica JMA presso Chikuzei;
4. Misuratore d'intensità sismica presso Kasama.

Tutte queste stazioni hanno registrato un'intensità sismica pari a "6 superiore" sulla scala d'intensità JMA che conta 10 livelli dove 0 è il livello più basso e 7 quello più alto (JMA, 1996). In Giappone, l'intensità sismica viene stabilita

automaticamente tramite sismografi oppure tramite appositi strumenti chiamati "misuratori d'intensità sismica" sulla base di dati relativi la forma d'onda. Su tutto il territorio nazionale JMA gestisce circa 600 di questi strumenti posizionati ad un intervallo di 20 km e ai quali vanno aggiunti i misuratori gestiti autonomamente dalle prefetture che porta il loro numero vicino alle 4000 unità (Zschau e Küppers, 2003). Le informazioni riguardanti la distribuzione delle intensità è disponibile pochi minuti dopo il sisma e permette l'eventuale sganciamento immediato di attività di protezione nell'ambito di una strategia di "early warning". Anche se, come detto, l'intensità viene determinata sulla base dello scuotimento misurato, tipici scenari di danno possono venir osservati in relazione ai diversi livelli di intensità. A seguito di scuotimento corrispondente al livello d'intensità "6 superiore" per le persone è impossibile tenersi in piedi; la maggior parte degli arredi si muove e si ribalta; pareti in muratura a blocchi non armati possono ribaltare; costruzioni in legno con una bassa resistenza sismica tendono a inclinarsi e possono anche collassare; nelle costruzioni in calcestruzzo progettate sismicamente è probabile che si formino delle fessure mentre per strutture che non lo sono fessure a "X" e scorrimenti sono da attendersi in pareti, travi e pilastri con conseguente pericolo di collasso (JMA, 1996).

In seguito sono riportate le osservazioni fatte dal

Fig. 55
Ubicazione degli strumenti considerati.



professor Sakai (Sakai, 2011) a cui, dove possibile, per motivi di completezza sono stati aggiunti dalla redazione i valori di scuotimento registrati presso le stazioni considerate.

4.1 Stazione K-NET presso Hakota

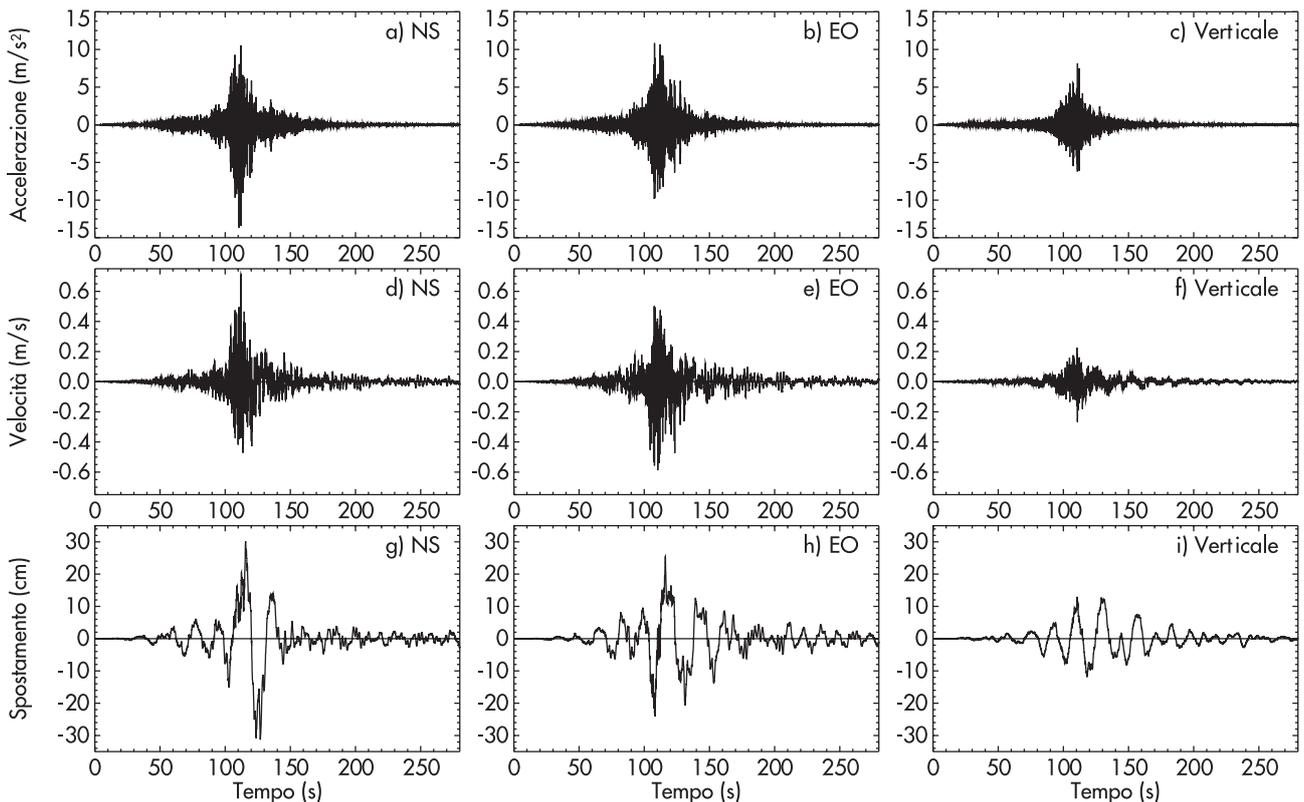
La stazione di misura è situata nei pressi del campo sportivo della città di Hakota e nell'ambito della rete K-NET viene identificata tramite la sigla IBR013. Le coordinate geografiche della stazione sono 36.1587N 140.4892E e l'altezza sul livello del mare è pari a 28.5 m. La distanza epicentrale è pari a 292 km. Come si evince dalla figura 56 la stazione è posizionata su terrapieno che sovrasta il terreno circostante di circa un metro.

I valori di scuotimento registrati durante il terremoto sono riportati in figura 57. L'accelerazione di picco al suolo nelle direzioni Nord-Sud e Est-Ovest è pari a rispettivamente 13.7 e 10.8 m/s² mentre il massimo della media geometrica è 11.4 m/s². L'accelerazione verticale massima di 8.1 m/s² è vicina all'accelerazione di gravità. Gli spostamenti orizzontali del terreno sono invece dell'ordine di alcuni decimetri. I valori degli spostamenti sono molto sensibili al filtro applicato alla traccia dell'accelerazione. L'obiettivo di questo dossier non è quello di disquisire sull'esatto valore degli spostamenti del terreno bensì di fornire un'impressione dello scuotimento a cui gli edifici hanno dovuto far fronte. È quindi possibile che in futuro a seguito di specifiche analisi mirate i valori di spostamento del terreno possano venir modificati.

Fig. 56
Stazione K-NET di Hakota
(Foto: Y. Sakai).



Fig. 57
Movimento del terreno
registrato presso la stazione
K-NET di Hakota (IBR013
D_{epi} = 292 km).



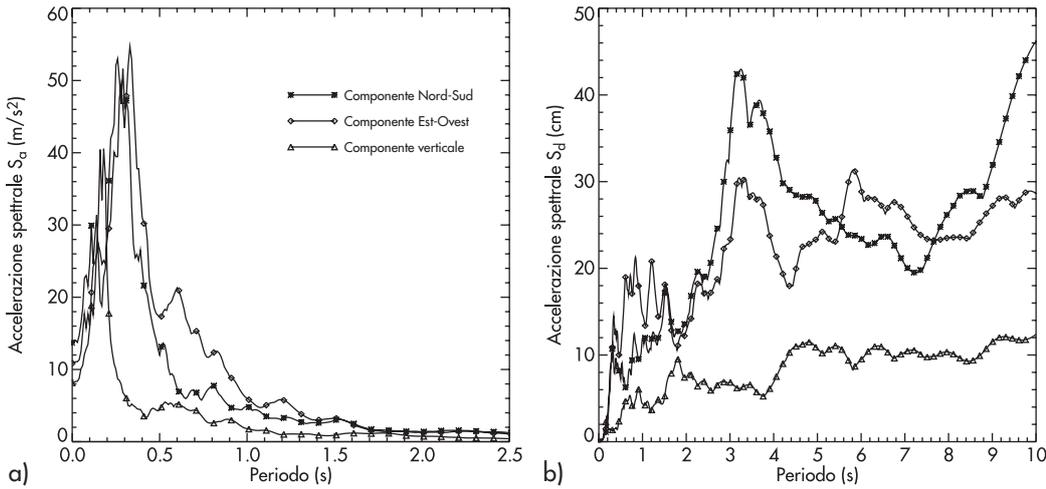


Fig. 58 Spettri di risposta dell'accelerazione (a) e degli spostamenti (b) calcolati per uno smorzamento viscoso $\xi=5\%$ a partire dal movimento del terreno registrato presso la stazione K-NET di Hakota (IBR013, $D_{epi} = 292$ km).



Fig. 59 Palazzetto sportivo il cui soffitto è crollato (a) e costruzione tradizionale in legno dalla quale sono cadute alcune tegole (b) (Foto: Y. Sakai).

La figura 58 riporta gli spettri di risposta dell'accelerazione e dagli spostamenti relativi al movimento del terreno registrato presso la stazione. Si noti l'amplificazione dell'accelerazione molto marcata per valori del periodo vicini a 0.3 s con picchi di risposta superiori a 50 m/s^2 (5 g!). Per periodi attorno a 1 s, il valore dell'accelerazione spettrale è di circa 6 m/s^2 . A seguito delle forti accelerazioni spettrali si riscontrano spostamenti spettrali dell'ordine di 10-15 cm già per periodi di 0.3 s, nella forcella di periodi possibili per strutture civili si nota una forte amplificazione a 3.2 s con ordinate spettrali nell'ordine di 30-40 cm. In un raggio di 200 metri dalla stazione di misura ci sono 22 edifici. A parte il soffitto del palazzetto dello sport che è crollato (Fig. 59a) e alcune tegole che sono cadute da due edifici tradizionali in legno (Fig. 59b) non sono stati riscontrati danni strutturali evidenti.

4.2 Stazione KiK-NET presso Iwase

Nell'ambito della rete sismometrica KiK-NET la stazione è contrassegnata dall'indicativo IBRH11 ed è situata a 36.3669N, 140.1434E ad un'altezza di 67 metri sul livello del mare. La distanza epicentrale è pari a 293 km. Lo strumento si trova all'estremità ovest della scuola media

Iwase-Higashi nella città di Sakuragawa. La scuola è in collina e il terreno immediatamente posteriore alla stazione è leggermente scosceso. I due edifici della scuola sono stati recentemente migliorati simicamente tramite telai in acciaio. I dettagli appena descritti sono raffigurati in figura 60.

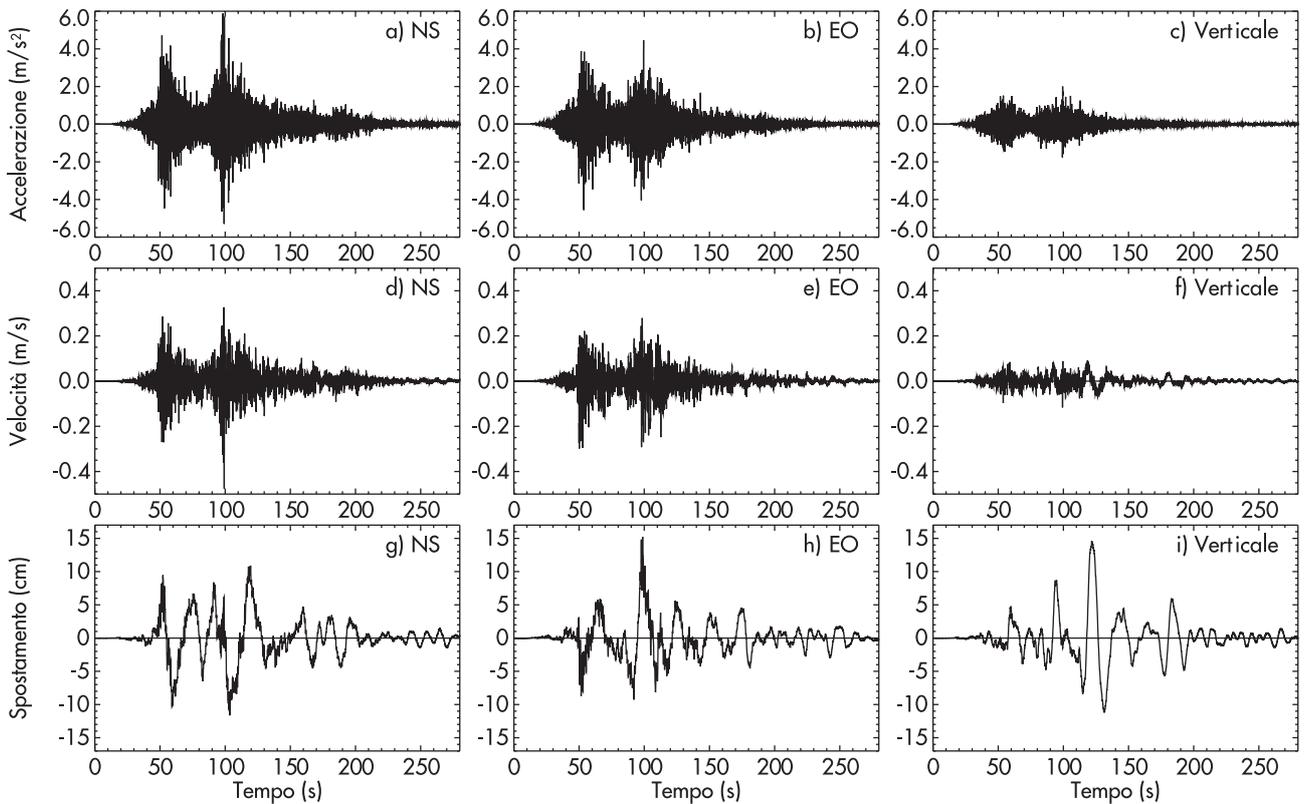
I valori di scuotimento registrati a Iwase rappresentati sia in termini di storie temporali del movimento al suolo (Fig. 61) che di spettri di risposta (Fig. 62) sono minori rispetto a quelli riscontrati a Hokota distante 39 km. L'accelerazione di picco al suolo nelle direzioni Nord-Sud e Est-Ovest è pari a rispettivamente 8.2 e 8.5 m/s^2 mentre il massimo della media geometrica è 6.8 m/s^2 . L'accelerazione verticale massima è di 8.1 m/s^2 . Anche in questo caso gli spostamenti orizzontali massimi del terreno sono dell'ordine di alcuni decimetri. Le accelerazioni spettrali massime sono circa la metà di quelle riscontrate a Hokota ma il periodo massimo per il quale si ha ancora un'ordinata dell'accelerazione orizzontale pari a 10 m/s^2 è simile in entrambi i casi (circa 0.85 s). Lo spettro di spostamento è caratterizzato da un picco degli spostamenti orizzontali (23 cm) in corrispondenza di un periodo di 0.6 s.

A seguito di questo scuotimento l'edificio scolastico nelle immediate vicinanze della stazione ha

Fig. 60
 Dettagli dell'ubicazione
 della stazione di misura
 KiK-NET di Iwase (a,b) ed
 edificio nelle sue immediate
 vicinanze (c,d - Foto: Y.
 Sakai).



Fig. 61
 Movimento del terreno
 registrato presso la stazione
 KiK-NET di Iwase (IBRH11),
 $D_{epi} = 293$ km.



subito danni strutturali lievi. Le colonne tozze in calcestruzzo di figura 63 non presentano fessure di taglio a "X" mentre piccole fessure sono state osservate in pareti indebolite da aperture (Fig. 64a). Il danno più significativo lo si è riscontrato alla base dell'edificio lungo il cui perimetro si

sono aperte vistose fessure (Figg. 64b e 65). I due edifici della scuola sono collegati da un corridoio sopraelevato provvisto di giunti di dilatazione. Il martellamento dovuto alle diverse oscillazioni ha portato a un danneggiamento locale non troppo importante (Fig. 66).

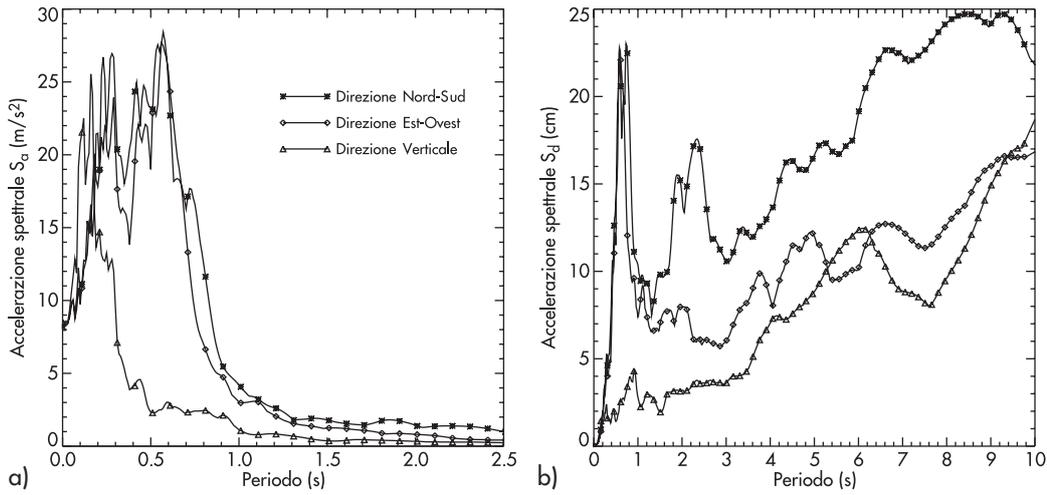


Fig. 62
Spettri di risposta dell'accelerazione (a) degli spostamenti (b) calcolati per uno smorzamento viscoso $\xi = 5\%$ a partire dal movimento del terreno registrato presso la stazione KiK-NET di Iwase (IBRH11, $D_{epi} = 293$ km).



Fig. 63
Assenza di fessure per taglio nelle colonne tozze in calcestruzzo (Foto: Y. Sakai).



Fig. 64
Piccole fessure in concomitanza con una finestra (a) e marcata fessura orizzontale alla base dell'edificio (b) (Foto: Y. Sakai).



Fig. 65
Fessurazione alla base dell'edificio (Foto: Y. Sakai).



Fig. 66
Distacco dell'intonaco e fessure flessionali in cima alle colonne che sostengono il corridoio di collegamento tra due edifici (a) e danni a un giunto di dilatazione dovuto a martellamento (b) (Foto: Y. Sakai).

In un raggio di 200 metri dalla stazione si trovano 21 edifici di cui 15 tradizionali in legno. In nessun edificio sono stati osservati danni strutturali di rilievo mentre otto di loro hanno subito danni leggeri alle tegole del tetto.

4.3 Stazione sismometrica JMA presso Chikuzei e misuratore d'intensità sismica di Kasama

In entrambi i caso al momento attuale non sono disponibili registrazioni dello scuotimento. L'intensità sismica riscontrata è però come già detto "6 superiore", quindi simile a quella di

Hakota e Iwase.

Dei 93 edifici situati in un raggio di 200 metri dalla stazione di Kasama nessuno ha subito danni strutturali significativi. In 19 casi tegole sono cadute dai tetti di case in legno (Fig. 67a), inoltre blocchi di tufo si sono staccati da un muro esterno (Fig. 67b) e alcuni edifici in legno hanno subito danni lievi alle pareti esterne (Fig. 68).

Presso la stazione di Chikuzei la situazione è analoga: dei 25 edifici (21 in legno) costruiti in prossimità della stazione nessuno ha subito danni importanti.

Fig. 67
Caduta di tegole dai tetti (a) e ribaltamento di blocchi dei tufo di un muro non armato (b) (Foto: Y. Sakai).



Fig. 68
Danni al rivestimento esterno di un edificio in legno (a) e fessurazione orizzontale in un edificio in legno (b) (Foto: Y. Sakai).



5. Danni ai viadotti della linea ferroviaria Tohoku Shinkansen

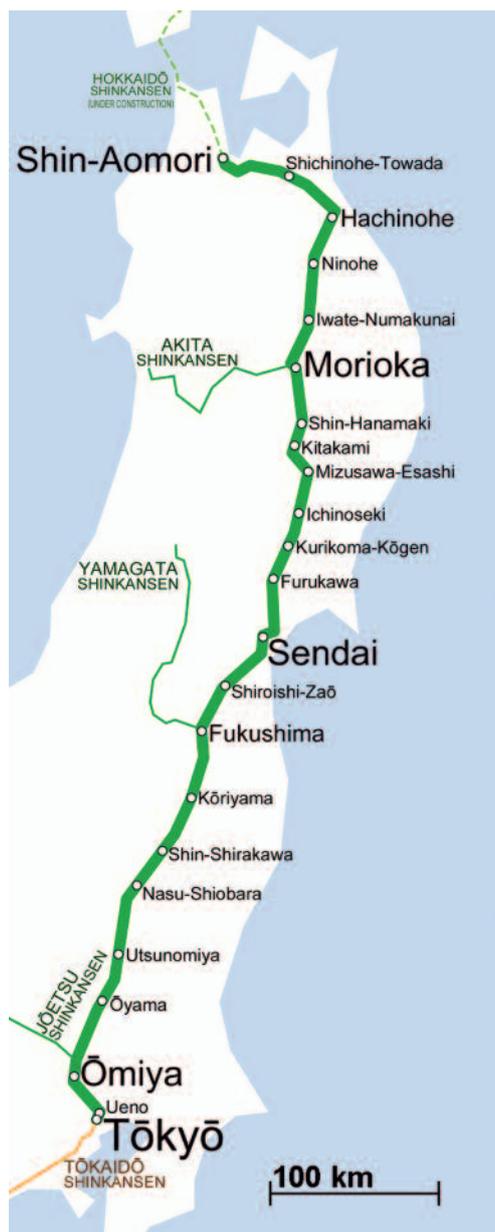
La linea ferroviaria ad alta velocità Tohoku Shinkansen collega Tokyo con la città di Shin-Aomori all'estremo nord dell'isola di Honshu nonché della regione di Tohoku come mostrato in figura 69. Immediatamente dopo il terremoto, il 15 marzo 2011, il professor Yoshikazu Takahashi del Centro per la Prevenzione dei Disastri dell'Università di Kyoto ha ispezionato alcuni viadotti della linea situati tra le stazioni di Kitakami e Shin-Hanamaki nella prefettura di Iwate alle progressive 448.6 km rispettivamente 463.1 km dalla stazione di Tokyo. È stata scelta questa porzione della tratta perché già nel 2003 a seguito del terremoto di South Sanriku si sono riscontrati severi danni ad alcuni manufatti. Il terremoto $M_w = 7.0$ di South Sanriku del 26

maggio 2003 ha avuto epicentro (38.81N, 141.68E) praticamente sulla costa circa 70 km a Sud-Est dalla zona considerata.

Nei paragrafi seguenti sono riportate le osservazioni fatte del professor Takahashi (Takahashi, 2011) alle quali sono stati aggiunti dalla redazione alcuni cenni riguardanti i valori di scuotimento registrato nelle vicinanze dei manufatti visitati per meglio poter apprezzare il danneggiamento osservato.

5.1 Aspetti progettuali dei viadotti

I viadotti della linea ferroviaria ad alta velocità Shinkansen sono stati costruiti negli anni 1977 e 1978 secondo le specifiche sia delle "Norme per la progettazione strutturale delle reti Shinkansen" – sviluppate appositamente per il progetto delle linee Tohoku, Joetsu e Narita – sia delle "Norme



tecniche per la progettazione di strutture in calcestruzzo, calcestruzzo armato e calcestruzzo precompresso” che sarebbero poi entrate in vigore nel 1979. Rispetto alle norme odierne, l’azione sismica di progetto, i metodi di verifica delle resistenze e i dettagli costruttivi richiesti soprattutto in termini di armatura trasversale riportati nei documenti di progetto appena elencati erano sostanzialmente differenti.

Come già ricordato, la linea ad alta velocità Tohoku Shinkansen ha subito seri danni durante il terremoto di South Sanriku del 2003, a seguito del quale il Ministero delle Infrastrutture, del Territorio e dei Trasporti ha imposto alle compagnie del più importante gruppo ferroviario giapponese (“Japan Railways Group”, JR) che gestisce anche le linee ad alta velocità di sviluppare metodi e strategie per il miglioramento sismico di

viadotti ferroviari esistenti. Questo sforzo ha mostrato come delle 51000 colonne che sorreggono i viadotti della Tohoku Shinkansen da Tokyo a Hachinohe, 12500 richiedessero un rinforzo sismico in termini di resistenza al taglio. Questi lavori di miglioramento sono stati completati nel 2007. La compagnia ferroviaria “JR-East” che gestisce la Tohoku Shinkansen è andata anche oltre e nell’aprile 2009 ha terminato il rinforzo di 31000 colonne e 2880 pile dei viadotti. Una seconda campagna di rinforzi mirata a migliorare il comportamento flessionale delle colonne di 6700 viadotti è iniziata del 2009 ed è previsto che venga terminata nel giro di 5 anni.

5.2 Scuotimento nelle vicinanze dei viadotti

La stazione di misura della rete accelerometrica K-NET di Kitakami (IWT012, 39.3209N, 141.1378E, H = 64, distanza epicentrale $D_{epi} = 154$ km) è situata a circa 500 m di distanza a Est della progressiva 451.3 km della linea ferroviaria Tohoku Shinkansen. Per questo motivo i dati di scuotimento li registrati sono indicativi dell’azione sismica subita dai manufatti considerati. Le tracce temporali del moto registrato sono riportate in figura 70 e si nota come l’andamento generale sia sostanzialmente diverso rispetto allo scuotimento registrato nella prefettura di Ibaraki e presentato nel capitolo precedente. A Hokota (Fig. 57) e a Iwase (Fig. 61) la fase intensa del movimento del terreno è stata una sola con valori di picco molto elevati, mentre a Kitakami sono presenti due fasi intense ben distinte i cui valori di picco sono però più modesti. L’accelerazione di picco al suolo nelle direzioni Nord-Sud e Est-Ovest è pari a rispettivamente 5.9 e 4.6 m/s^2 mentre il massimo della media geometrica è 3.9 m/s^2 . L’accelerazione verticale massima è invece pari a 2.0 m/s^2 . Gli spostamenti massimi del terreno sono dell’ordine di grandezza di circa 10-15 cm in tutte le direzioni. Gli spettri di risposta dell’accelerazione e degli spostamenti sono presentati in figura 71 dove si possono notare delle amplificazioni abbastanza marcate in concomitanza dei periodi 0.3 s (28.4 m/s^2) e 0.6 s (19.6 m/s^2). L’accelerazione di risposta verticale è sempre ben minore rispetto all’accelerazione di gravità. Per quanto riguarda gli spostamenti spettrali si noti un’amplificazione marcata pure a 0.3 s (18 cm) e a 1.3 s (22 cm). In corrispondenza di un periodo di circa 2 s gli spostamenti spettrali raggiungono un minimo locale per poi aumentare linearmente fino a 10 s, periodo massimo considerato in questo dossier.

Nelle vicinanze della stazione di misura, il tracciato della linea ferroviaria è diritto con un

Fig. 69
Percorso della linea ad alta velocità Tohoku Shinkansen (Foto: Hisagi da Wikipedia).

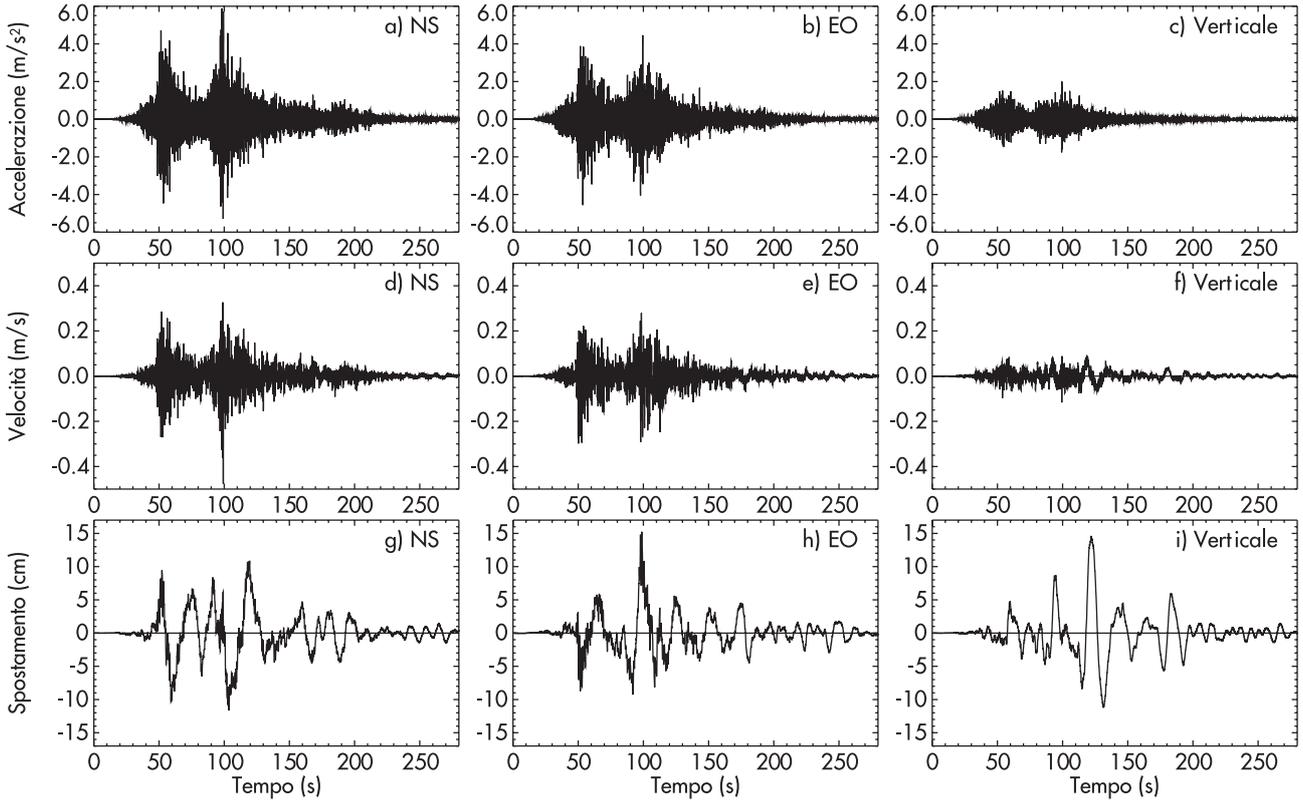


Fig. 70
Movimento del terreno registrato presso la stazione K-NET di Kitakami (IWT012, $D_{epi} = 154$ km).

Fig. 71
Spettri di risposta dell'accelerazione (a) e degli spostamenti (b) calcolati per uno smorzamento viscoso $\xi=5\%$ a partire dal movimento del terreno registrato presso la stazione K-NET di Kitakami (IWT012, $D_{epi} = 154$ km).

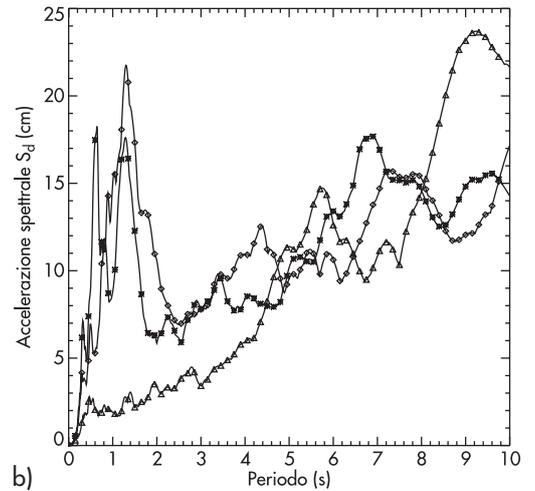
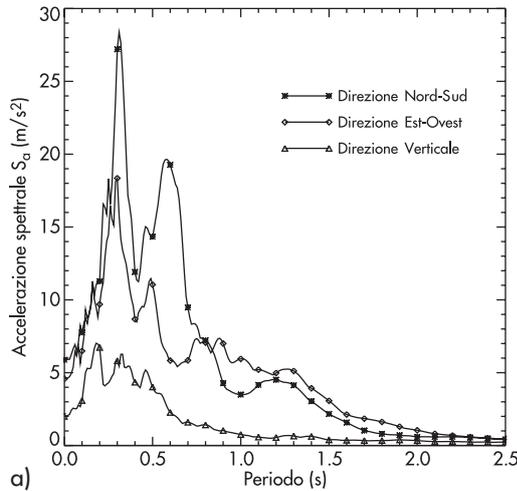


Fig. 72
Viadotto "Waga No. 1".
Si noti il rinforzo sismico della parte superiore delle colonne (Foto: Y. Takahashi).

azimut di circa 15 gradi. In prima approssimazione si può quindi considerare che la componente Nord-Sud del terremoto abbia agito in direzione longitudinale dei viadotti mentre la componente Est-Ovest abbia agito in direzione trasversale. È ovviamente possibile ruotare le componenti del terremoto in modo da farle corrispondere esattamente alle due direzioni principali del manufatto, questo ulteriore passo va però oltre lo scopo di questo dossier.

5.3 Danni osservati

5.3.1 Viadotto Waga No. 1

Il viadotto "Waga No. 1" ha una lunghezza di 309 metri ed è situato alla progressiva 447 km,



quindi immediatamente prima della stazione ferroviaria di Kitakami. La sottostruttura chiaramente visibile in figura 72 è caratterizzata da un massiccio telaio tridimensionale ulteriormente irrigidito da travi di connessione poste a circa mezz'altezza delle colonne. Nell'ambito delle campagne di miglioramento sismico menzionate in precedenza, la duttilità e la resistenza al taglio della parte sommitale delle colonne sono state incrementate grazie a dei mantelli in acciaio. Durante l'ispezione non sono stati riscontrati danni.

5.3.2 Viadotto Okaijima No. 3

Il viadotto "Okaijima No. 3" ha una lunghezza



di 279 metri ed è situato alla progressiva 452 km. L'impalcato è sorretto da una serie di telai monopiano. In passato il viadotto non ha subito nessun intervento di rinforzo, ciononostante non ha subito danni strutturali durante il terremoto. Alcuni pali dell'elettificazione si sono però inclinati come si evince dalla figura 73a mentre alla base di alcune colonne si è formata un'apertura tra la colonna stessa e il terreno circostante (Fig. 73b). Quest'ultima osservazione lascerebbe credere che il manufatto abbia oscillato significativamente in direzione trasversale.



Fig. 73
Viadotto "Okaijima No. 3".
Inclinazione dei pali di
sostegno della linea di
contatto (a) e fessura tra la
base della colonna e il
terreno (b) (Foto: Y.
Takahashi).

5.3.3 Viadotto Torigui No. 5

Il viadotto "Torigui No. 5" ha una lunghezza di 489 metri ed è situato alla progressiva 453 km; la distanza della stazione di misura K-NET di Kitakami è quindi di soli 500 m. Anche in questo caso la sottostruttura consiste in un telaio monopiano (Fig. 74a) e in cima alla colonna R9 dell'ultima campata in direzione di Tokyo si è osser-

vato uno schema di fessurazione a "X" causato dal taglio trasversale (Fig. 74b). Come per il viadotto "Okaijima No. 3", alla base di diverse colonne si è osservata anche qui una separazione tra colonna e terreno circostante. Figura 74c mostra inoltre la presenza di sabbia in superficie ("Sand boils") che lascerebbe supporre la presenza di fenomeni di liquefazione.



Fig. 74
Viadotto "Torigui No. 5".
Vista della sottostruttura (a),
dettaglio di una colonna
con tipica fessurazione per
taglio (b) e tracce di
liquefazione alla base di
una colonna (c) (Foto: Y.
Takahashi).

Fig. 75
Danneggiamento delle
colonne del Viadotto
"Nakasone No. 1" (Foto: Y.
Takahashi).



5.3.4 Viadotto Nakasone No. 1

Il viadotto "Nakasone No. 1" ha una lunghezza di 103 metri ed è situato alla progressiva 456 km. La distanza dalla stazione di misura K-NET di Kitakami è pari a circa 2.7 km, è però forse utile osservare che viadotto e stazione di misura si trovano sulle due sponde diverse del fiume Kitakami. Questo viadotto e un altro in successione hanno subito gravi danni strutturali. La figura 75 mostra il collasso occorso nella parte alta di alcune colonne con conseguente perdita totale della capacità portante. Sembra verosimilmente trattarsi di una rottura per taglio con conseguente sgretolamento del nucleo in calcestruzzo. Si può osservare come la rottura e lo sgretolamento siano occorsi in concomitanza del giunto di costruzione della colonna. Le colonne più danneggiate sono state quelle vicine alle estremità del

viadotto mentre presso le colonne più interne si sono osservate solo delle fessurazioni. In questo caso le fessurazioni per taglio a "X" sono presenti sia in direzione longitudinale che trasversale. Le riparazioni sono cominciate tre giorni dopo il terremoto. Come prima attività sono stati eseguiti scavi per liberare plinti e travi di fondazione e controllare il loro stato. In questo ambito non si sono riscontrati danni.

5.3.5 Viadotto Inohana No. 5

Il viadotto "Inohana No. 5" ha una lunghezza di 301 metri ed è situato alla progressiva 469 km. Durante il terremoto di South Sanriku del 2003 il viadotto ha subito importanti danni strutturali sia per flessione che per taglio. Le colonne alle estremità del ponte avevano riportato espulsione del calcestruzzo mentre quelle intermedie si

Fig. 76
Vista generale del Viadotto
"Inohana No. 5".
(Foto: Y. Takahashi).





Fig. 77
 Dettagli delle colonne
 rinforzate del Viadotto
 "Inohana No. 5".
 (Foto: Y. Takahashi).

erano fessurate per taglio. Le colonne danneggiate sono state riparate in una prima fase iniettando di resina epossidica le fessure e sostituendo il copriferro espulso, in seguito si è aggiunto un mantello in acciaio. Alcune colonne particolarmente danneggiate sono state rinforzate tramite fibre in kevlar.

Il viadotto così riparato rappresentato in figura 76 non ha subito danni strutturali a seguito del

terremoto dell'11 marzo anche se sottoposto a severo scuotimento come indicato dalle fessure che anche in questo caso si sono create tra la base delle colonne e il terreno circostante a seguito delle oscillazioni in direzione trasversale al manufatto. In figura 77 si osserva inoltre una leggera corrosione delle piastre del mantello in acciaio causata dall'alta umidità dovuta alla falda vicina alla superficie.

6. Scuotimento sismico nella città di Tokyo

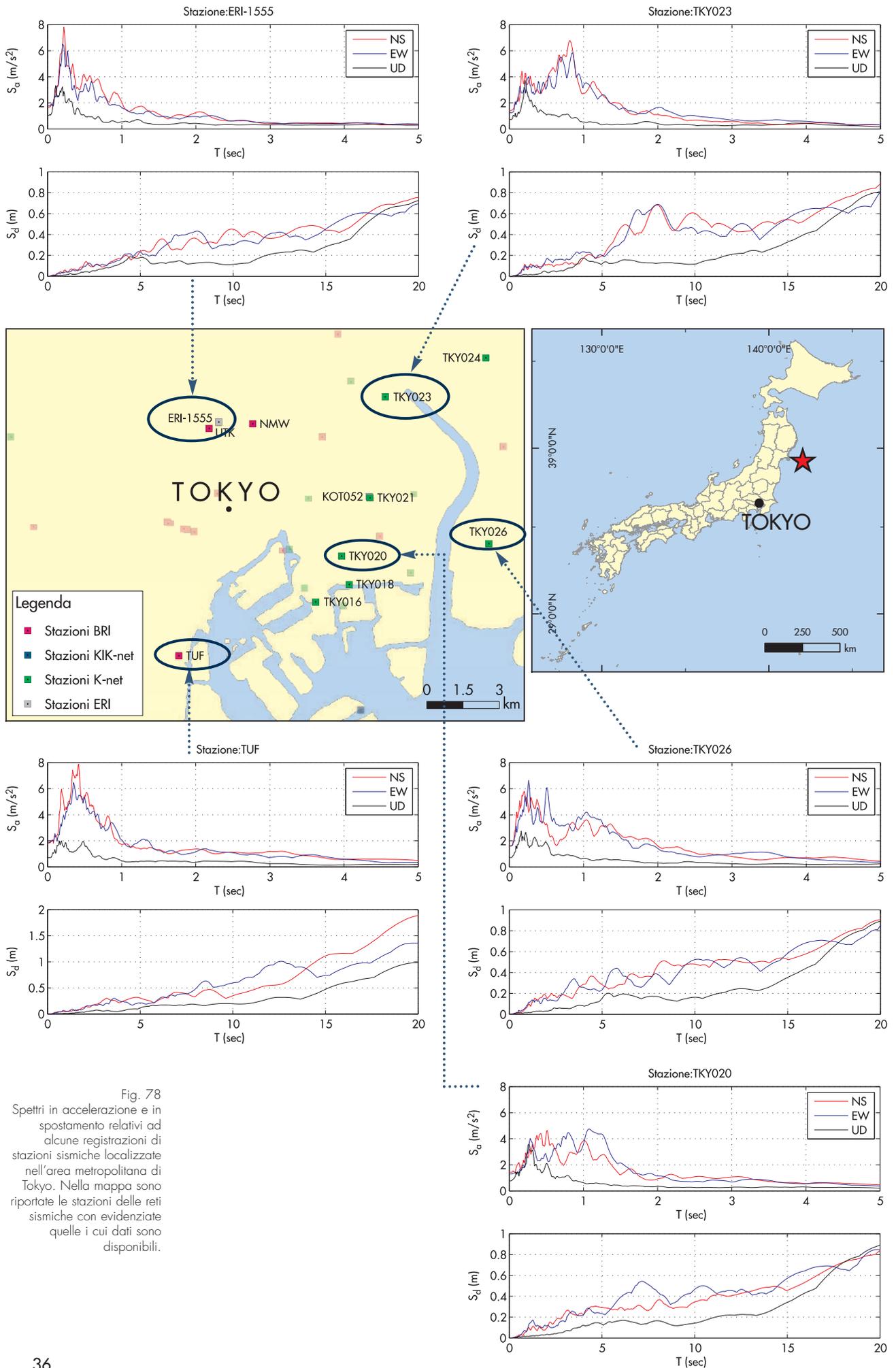
Per completezza di trattazione, è interessante osservare lo scuotimento sismico registrato nella città di Tokyo, che si trova a circa 370 km dall'epicentro del sisma e che, in base alle informazioni finora a disposizione, non sembra aver subito danni particolarmente meritevoli di nota. In figura 78 sono mostrati gli spettri in accelerazione e spostamento relativi alle registrazioni di alcune stazioni ubicate proprio nell'area metropolitana di questa grande città. Le elaborazioni sono state effettuate utilizzando un filtro passa alto ad una frequenza di 0.015 Hz applicato alle registrazioni accelerometriche. Si osservano picchi massimi di accelerazione orizzontale del suolo di circa 0.2 g, e accelerazioni spettrali di 0.8 g a periodi di $0.2 \div 0.25$ s in corrispondenza della stazione

ERI-1555 e a periodi più elevati (circa 0.4 s) alla stazione TUF. Mentre i picchi massimi di accelerazione spettrale alla stazione ERI-1555 sono concentrati in una stretta banda di periodi ($0.15 \div 0.35$ s), le registrazioni delle altre stazioni mostrano un allargamento della banda massima verso i lunghi periodi, fino a $1 \div 1.5$ s. Le registrazioni a Tokyo sono caratterizzate da elevata energia sui lunghi periodi (superiori a 20 s come si può evincere dagli spettri in spostamento). Ciò non è sorprendente a causa dell'effetto combinato della magnitudo del sisma (la frequenza d'angolo di una registrazione lontana dall'epicentro è inversamente proporzionale alla radice cubica del momento sismico e quindi della magnitudo) e della distanza dall'epicentro (le alte frequenze si attenuano più rapidamente al crescere della distanza).

7. Conclusioni

Il terremoto M_w 9.0 di Tohoku e la seguente onda di tsunami che hanno colpito il Nord-Est del Giappone l'11 marzo 2011 sollevano molti interrogativi che dovranno trovare risposta nell'ambito delle strategie per la riduzione del rischio sismico. Dalle prime informazioni sembra che la grande maggioranza dei danni sia stata causata dall'onda di tsunami, la cui altezza effettiva ha superato abbondantemente i parametri di progetto. Le tracce temporali del movimento del terreno nonché 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. Nonostante i valori di scuotimento a tratti molto importanti, il danneggiamento che ne è risultato sembra essere abbastanza modesto. Questa positiva osservazione può essere senz'altro ricondotta alla progettazione antisismica delle strutture nuove e al miglioramento sismico di quelle esistenti da anni curato in Giappone. Non sono però da escludere altre cause come ad esempio particolari effetti dovuti alle caratte-



ristiche dello scuotimento oppure più semplicemente al fatto che una parte sostanziale dei danni dovuti allo scuotimento non è ancora stata riportata a seguito sia dell'estensione della zona colpita sia della precedenza mediatica data agli effetti dello tsunami e dell'incidente nucleare presso la centrale di Fukushima.

Quest'ultima ipotesi è ad esempio supportata dal rapporto di ricognizione di Kanakubo e Yasojima (2011) giunto in redazione appena prima di dare alle stampe il dossier. Il rapporto discute gli effetti del sisma osservati nel nord della prefettura di Ibaraki. Il capitolo 4 del dossier tratta già di danni osservati in questa prefettura e al lettore attento non sarà certo sfuggito che i danni riportati sono molto modesti a fronte di uno scuotimento assai severo. Ebbene, il nuovo rapporto ridimensiona in parte questo aspetto presentando ad esempio il danneggiamento sofferto dal municipio della città di Kasama, località già menzionata in Sezione 4.3. L'edificio è visibile in figura 79 dove si notano i severi danni subiti a seguito dello scuotimento. Le colonne del primo piano sono collassate per taglio e alcune in modo tale da perdere la capacità di sostenere carichi verticali. Le

colonne collassate hanno una dimensione di 550 mm in direzione della rottura per taglio, l'armatura longitudinale consiste in 10-12 barre lisce diametro 22 mm mentre quella orizzontale è costituita da barre lisce diametro 9 mm ogni 250 mm. Le colonne hanno una luce di taglio di 780 oppure 1800 mm. Oltre alle colonne anche alcune pareti in calcestruzzo presentano rotture per taglio. A giudicare dai dettagli costruttivi, l'edificio è abbastanza vecchio e la situazione di quasi collasso è senz'altro compatibile con lo scuotimento ipotizzabile a Kasama sulla base dei dati di misura presentati nel capitolo 4.

Un danneggiamento importante si presenta anche nella città di Takahagi situata 50 km a nord-est di Kasama. Secondo Kanakubo e Yasojima (2011), su 1171 edifici ispezionati 200 sono stati dichiarati pericolanti ("red tag"), 324 non sicuri ("yellow tag") mentre i restanti 647 sono probabilmente sicuri ma necessiteranno una valutazione più approfondita in futuro ("green tag"). Un edificio di Takahagi giudicato pericolante è il municipio costruito nel 1964. Le figure 80 e 81 mostrano i danni subiti dall'edificio dove si notano chiaramente le rotture per taglio delle colonne



Fig. 79
Rottura per taglio di colonne e setti dell'edificio municipale di Kasama (Foto: T. Kanakubo e A. Yasojima).

Fig. 80
Rottura per taglio di colonne
dell'edificio municipale di
Takahagi (Foto: T.
Kanakubo e A. Yasojima).

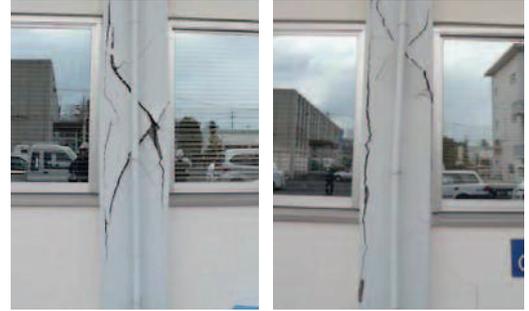


Fig. 81
Rottura per taglio della
parete trasversale esterna
dell'edificio municipale di
Takahagi (Foto: T.
Kanakubo e A. Yasojima).



e della parete trasversale esterna.
Il terremoto di Tohoku per magnitudo, area col-
pita nonché quantità e qualità della documenta-

zione disponibile è destinato a divenire uno dei
più studiati. Questo dossier presenta solo una
piccola parte delle informazioni ora disponibili.

Ulteriori ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Carlo G. Lai
per la consulenza fornita riguardante la parte sismo-
logica. Si ringraziano inoltre l'Ing. Davide Bellotti e

l'Ing. Valentina Vurro per il supporto fornito nell'ela-
borazione di alcune immagini, indispensabile per la
stesura del presente dossier.

Bibliografia

- 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).
- 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).
- Zschau J., Küppers A.N. (2003) - Early warning systems for natural disaster reduction. Springer.