

# STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(No. 36 Agustus 2012)

Publikasi Bersama Federasi Besi dan Baja Jepang dan  
Masyarakat Konstruksi Baja Jepang

## *Versi Bahasa Indonesia*

Versi Bahasa Inggris *Steel Construction Today & Tomorrow* diterbitkan tiga kali dalam setahun dan disirkulasikan ke seluruh dunia kepada para eksekutif, perusahaan perdagangan industri, dan organisasi administratif yang berminat. Tujuan utama publikasi ini adalah memperkenalkan standar dan spesifikasi mengenai konstruksi baja, contoh-contoh proyek konstruksi mutakhir, teknologi dan material konstruksi mutakhir dan lainnya di bidang konstruksi bangunan dan keteknik-sipil.

Agar pembaca Indonesia dapat memahami artikel yang ada, disiapkan versi Bahasa Indonesia yang berisi teks saja, dan dilampirkan pada versi Bahasa Inggris. Dalam versi Bahasa Indonesia, foto, gambar dan tabel hanya ditampilkan judulnya saja. Oleh karenanya perlu merujuk ke publikasi versi Bahasa Inggris untuk melihat isinya. Juga, bila dibutuhkan konfirmasi teknis ataupun rincian yang lebih teknis dari sebuah teks, silakan merujuk ke publikasi versi Bahasa Inggris.

## No. 36 Agustus 2012: Isi

### *Fitur Khusus*

#### **Gempa Bumi Besar Jepang Timur**

Bagaimana Berinteraksi dengan dan Menyiapkan Diri untuk Bencana Alam? _____	1
Fasilitas Pantai: Pelajaran dari Gempa dan Tsunami _____	3
Kerusakan terhadap Tanggul Sungai dan Langkah-Langkah Restorasi dan Rekonstruksi _____	6
Kerusakan akibat Likuifaksi terhadap Rumah Rumah dan Pipa Kabel Tanam _____	9
Pengolahan Debris dan Endapan Tsunami, dan Pemanfaatan Efektifnya untuk Restorasi dan Rekonstruksi _____	15

### *Teknologi Aplikasi Baja*

Detil Dasar mengenai Korosi dan Perlindungan Korosi _____	18
---	----

### Simposium mengenai Riset Struktur Baja

Teknik Sipil \_\_\_\_\_ Sampul Belakang

---

Versi Indonesia: ©Federasi Besi dan Baja Jepang 2012

Federasi Besi dan Baja Jepang

3-2-10 Nihonbashi-Kayabacho, Chuo-ku, Tokyo

103-0025, Jepang

Fax: 81-3-3667-0245 Telpon: 81-3-3669-4815

Alamat surat: sunpou@jisf.or.jp

URL <http://www.jisf.or.jp>

## **Fitur Khusus: Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2011**

(Hal 1~2)

### **Bagaimana Berinteraksi dengan dan Menyiapkan Diri untuk Bencana Alam**

Oleh Nobuo Shuto, Profesor Emeritus, Tohoku University

#### **Peningkatan Teratur Infrastruktur Sosial**

Di Jepang, inventarisasi infrastruktur sosial termasuk struktur untuk penanganan bencana alam mulai meningkat setelah 1960. Alasan utama peningkatan ini adalah adanya skema penggandaan penghasilan dan ketersediaan dana yang dibutuhkan untuk peningkatan dan pengembangan infrastruktur

Lokasi konstruksi teknik sipil berubah. Tanah, kayu dan batu yang semula merupakan material utama dalam teknik sipil konvensional kemudian digantikan oleh baja dan beton. Perancah kayu digantikan dengan pipa-pipa baja. Vibrator kemudian mulai digunakan dalam pengecoran beton. Demikian juga, penggunaan mesin-mesin konstruksi secara besar-besaran mempersingkat waktu konstruksi dan meningkatkan reliabilitas struktural.

Sebelumnya, bahkan jalan raya nasional utama sekalipun terbuat dari jalan batu, tetapi sekarang bahkan jalan antar sawah di pertanian pun diberi perkerasan. Tanggul-tanggul dan dam dibangun sehingga jarang terjadi banjir. Sebagaimana pada Gb. 1, jumlah kematian yang disebabkan oleh bencana alam menurun tajam setelah 1960

#### **Persiapan Tsunami**

Penanggulangan apa yang dilakukan menghadapi tsunami? Sebelum Tsunami Showa Sanriku tahun 1933, penanggulangan tsunami adalah dengan cara tinggal di puncak bukit dan mencari perlindungan pada saat tsunami menyerang, kecuali pada kasus-kasus tertentu. Bahkan setelah 1933, penanggulangan utama yang dilakukan adalah dengan tinggal di puncak bukit. Akan tetapi, di Kamishi, Taro dan tiga daerah urban lainnya di Area Tohoku dimana tidak terdapat areal yang luas, dibangun satu persatu tanggul pasang dan dinding laut.

Pada saat itu, ternyata radio dapat digunakan untuk peringatan akan tsunami sehingga penggunaan radio mulai meningkat. Pada tahun 1941, penggunaan radio untuk sistem peringatan tsunami ditujukan untuk area Sanriku (bagian paling timur pantai Pasifik Jepang).

Pada tahun 1952 area target diperluas menjadi seluruh negara dan Undang-Undang Layanan Meterologi diberlakukan. Tepat sebelum 1952, sistem sementara peringatan tsunami berfungsi dengan baik pada saat tsunami yang disebabkan oleh Gempa Bumi Tokachi-Oki

#### **Apakah Struktur Pencegahan-tsunami dapat dipercaya?**

Struktur penanggulangan-tsunami pertama kali diuji-coba untuk penanggulangan utama di lapangan pertama kali pada saat gempa bumi Valdivia di Chile pada tahun 1960. Tsunami ini mempengaruhi keseluruhan panjang Jepang dari ujung selatan Hokkaido hingga ke ujung selatan Okinawa; jangkauannya mencapai 6 m pada daerah yang sangat tinggi dan 3~4 m di daerah lainnya. Oleh karenanya dampak tsunami dirasakan oleh struktur-struktur yang ada di daerah tersebut. Undan-Undang Penanganan Khusus menekankan bahwa “langkah-langkah pencegahan tsunami perlu diterapkan dan struktur-pencegah tsunami perlu di model ulang.” Salah satu hasilnya adalah dibangunnya tanggul raksasa pencegah tsunami di Ofunato dan struktur raksasa lainnya. Di samping itu, sistem peringatan tsunami internasional juga disiapkan. Kenyataannya, pada masa tersebut orang masih meragukan struktur pencegah-tsunami. Keraguan ini secara simbolik ditunjukkan dengan tulisan pada berapa foto di *Laporan Tsunami Sanriku* yang diterbitkan untuk mengenang tsunami Valdivia (oleh Komite Survei Area Sanriku). Tulisan tersebut berbunyi: “Apakah manusia yang mengontrol alam? Atau, apakah alam menertawakan manusia?” Akan tetapi, begitu pembangunan struktur pencegah tsunami selesai, tsunami akibat Gempa Bumi Tokachi-Oki menyerang area Sanriku. Karena tinggi tsunami ini tidak melebihi tinggi tsunami Valdivia, efeknya hampir tidak terlihat.

Dari kasus ini, jelaslah bahwa tenaga alam dari kekuatan yang terbatas dapat dikontrol dengan pemanfaatan struktur buatan manusia seperti di atas, dan pada gilirannya memperkuat konsep bahwa efek tsunami maupun banjir bisa dihilangkan dengan penggunaan struktur buatan manusia. Tentunya, sekalipun bangunan struktur dapat mengontrol tenaga alam, namun tetap ada keterbatasan dalam kapasitasnya. Generasi yang membangun struktur-struktur ini telah mempelajari efektifitas struktur pencegah tsunami dengan melihat bagaimana

struktur-struktur tersebut menahan gaya luar; namun mereka lupa bahwa tiap struktur akan mencapai kapasitas batas. Generasi berikutnya merasa yakin bahwa gaya luar alam dapat dikontrol dengan penggunaan bangunan struktur. Akan tetapi, mereka lupa akan pentingnya mempersiapkan hal terburuk. Sikap ini tercermin dalam suatu ulasan baru-baru ini dan prioritas program pemerintah yang dapat dirangkum sebagai: “Tanggul untuk perlindungan Tokyo terhadap banjir 200-tahunan dianggap tidak perlu.”

### **Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2011**

Pada tanggal 11 Maret 2011, terjadi Gempa Bumi Jepang Timur. Badan Meteorologi Jepang tidak mampu memprediksi gempa tersebut secara akurat. Berdasarkan teori struktural wilayah gempa, yang didasari atas 30 tahun pengamatan, ketiga blok masing-masing akan bergerak independen; sementara dalam kejadian gempa bumi ini, ketiga blok bergerak serentak. Apabila lima milyar tahun telah berlalu sejak bumi lahir dan apabila masa hidup manusia adalah 50 tahun, maka 30 tahun pengamatan geologis ekuivalen dengan *check-up* manusia selama 10 detik. Kesalahan dalam teori struktural wilayah gempa dapat ditimpakan kepada asumsi bahwa segalanya dapat dimengerti melalui pengamatan selama 30 tahun saja. Kesalahan ini akan dikoreksi melalui observasi kontinyu selama tiga atau empat tahun dan melalui studi mendalam mengenai tsunami lain yang telah terjadi.

### **Bagaimana Mencegah atau Mitigasi Kerusakan akibat Tsunami**

Pada tahun 1983, “Pedoman Langkah-Langkah Pencegahan Bencana di Area yang Sering Terancam Tsunami (draf) dibuat bersama dengan Biro Sungai, Kementrian Konstruksi, dan Dinas Perikanan. Pada tahun 1998, “Pedoman Penguatan Penanggulangan Tsunami di daerah Rencana Setempat Pencegahan Bencana” dipersiapkan dengan persetujuan tujuh dinas pemerintah daerah tsunami. Kedua pedoman secara jelas menyatakan bahwa tsunami besar dicegah dengan struktur buatan manusia, dan bahwa kehidupan manusia harus dilindungi dengan sistim pencegahan-bencana, dan bahwa bencana harus dikontrol dengan cara membangun kota yang tahan tsunamai. Oleh karenanya, pada saat tsunami besar seperti Gempa Bumi Besar Jepang Timur yang terjadi sekali dalam satu millennium, sudah dapat diantisipasi bahwa tsunami tersebut akan melimpahi atau

menghancurkan semua struktur pencegah tsunami

Banyak contoh dalam tsunami ini yang menunjukkan bahwa ketergantungan yang tinggi terhadap struktur pencegah tsunami dan ketergantungan terhadap informasi sesaat akan berakhir pada penderitaan. Contohnya, sekalipun area Kirikari di Kota Ozuchi di Prefektur Iwate dinyatakan berada di luar area banjir, dan juga telah dipindah puncak bukit sejak tahun 1933, tingkat kematian di area ini adalah tertinggi di antara tempat-tempat yang terkena tsunami. Di Touni-Hongo, Kota Kamaishi di Prefektur Iwate, ada seorang nenek, yang mengalami Tsunami Showa Sanriko tahun 1933, tinggal di puncak bukit dan mengungsi ke tempat yang lebih tinggi lagi tepat setelah gempa bumi. Putrinya, yang juga tinggal di puncak bukit, juga mengungsi karena mereka sudah sepakat untuk menyelamatkan diri apabila terjadi gempa bumi. Cucu wanita tersebut yang berusia 40 tahun dan tinggal di dataran lebih rendah terjebak tsunami karena ia meyakini bahwa tanggul anti-tsunami akan melindunginya. Setelah melihat tsunami melampaui tanggul, ia menyelamatkan diri dengan memacu mobilnya tetapi tetap terjebak gelombang tsunami

Struktur pencegah tsunami yang terpasang saat ini sangat mampu melindungi dari tsunami yang terjadi beberapa puluh-tahunan, atau seratus-tahunan. Namun demikian, saat ini banyak studi dilakukan untuk mendapatkan struktur yang dapat diandalkan untuk mencegah kerusakan akibat tsunami dengan skala yang jauh lebih besar.

Sekalipun demikian, nyawa manusia tidak dapat sepenuhnya terlindungi hanya dengan struktur buatan manusia. Yang lebih penting lagi adalah “tinggal di puncak bukit, menilai situasi dengan mata sendiri, dan menyelamatkan diri dengan inisiatif sendiri.” Hanya dengan demikian kita dapat melakukan mitigasi efek bencana alam. Konsep dasar ini tidak akan pernah berubah

Gbr. 1 Tren yang Tewas dan Hilang akibat Bencana Alam di Jepang



(Halaman 3~5)

### **Fasilitas Pantai: Pelajaran dari Gempa dan Tsunami**

Oleh Takahiro Sugano, Institut Riset Pelabuhan and Pelabuhan Udara

## Pengantar

Pada tanggal 11, 2011, gempa bumi terbesar yang pernah tercatat di Jepang menghantam pantai wilayah Tohoku Jepang dan oleh Badan Meteorologi Jepang dinamakan “Gempa Bumi Lepas Pantai Tohoku 2011.” Gempa bumi dengan  $M_w=9,0$  menimbulkan gerakan keras yang dapat dirasakan di pulau Honshu dari Teluk Tokyo ke utara pulau, dan menimbulkan serangkaian tsunami yang menghancurkan komunitas di seluruh wilayah. Gempa susulan yang signifikan ( $M_w>7$ ) terjadi dan menambah kerusakan di pantai Tohoku selama dilakukan tanggap darurat dan upaya pemulihan.

Laporan ini meringkas temuan-temuan tim peneliti dari Institut Riset Pelabuhan dan Pelabuhan Udara setelah melakukan investigasi terhadap struktur pantai sepanjang 600 km garis pantai, serta percobaan dan analisa lanjutan. Fitur karakteristik gerakan tanah yang terlihat adalah komponen durasi panjang dan frekuensi tinggi. Inilah yang mengakibatkan tingkat kerusakan fasilitas pantai akibat gerakan tanah cukup kecil. Luasnya cakupan observasi memungkinkan interpretasi pola kerusakan di seluruh wilayah yang terdampak gempa bumi, dengan membedakan kerusakan struktur pantai akibat guncangan keras permukaan tanah dan efek sekunder (yaitu likuifaksi, keruntuhan permukaan tanah, penurunan tanah) yang diakibatkan oleh banjir tsunami.

## Kerusakan Struktur Pantai

Sering kali kondisi struktur yang diperiksa selama investigasi kami merupakan efek gabungan dari gempa bumi dan tsunami, dan tidak mungkin menentukan urutan kerusakan yang terjadi maupun masing-masing pengaruh beban tsunami dan seismik di lapangan. Pendugaan dilakukan berdasarkan penilaian teknik secara kolektif, diimbuh pengalaman langsung dalam struktur pantai dan gempa seluruh dunia serta hasil analisa studi (seperti investigasi “kriminal”) berbagai kasus serupa.

Dalam laporan ini banyak interpretasi mengenai mode kegagalan yang merupakan opini yang di kemudian hari akan diperbaiki apabila diperoleh data yang lebih lengkap dari lokasi kejadian. Temuan dan rekomendasi dalam laporan awal ini ditujukan untuk mengulang diskusi komunitas teknik pelabuhan, meningkatkan upaya riset, yang diharapkan membawa kearah peningkatan pengetahuan dan penerapan terbaiknya.

Dalam laporan ini, saya ingin mendiskusikan mengenai kerusakan tipikal akibat kombinasi efek

gerakan gempa dan tsunami serta menyampaikan pendapat saya tentang rupa konsep disain masa depan terkait efek gempa dan tsunami

Salah satu fitur kerusakan yang diakibatkan oleh gerakan tanah adalah isu deformasi dinding dermaga ke arah laut dan tenggelamnya tanah di belakang dinding dermaga. Deformasi dinding dermaga ke arah laut sering menunjukkan bentuk lengkung gradual, sekalipun cukup kecil dibandingkan dengan pergeseran tepi dermaga, seperti pada foto 1. Banyaknya tanah yang tenggelam tepat di belakang dinding dermaga mempunyai kecenderungan bertambah sesuai dengan besarnya pergerakan ke arah laut. Oleh karenanya seringkali keseluruhan tempat sandar kapal tidak dapat digunakan lagi.

Foto 1 Kerusakan Dinding Dermaga Turap Baja di Pelabuhan Hokkaido selama Gempa Bumi Hokkaido-Nansei-Oki pada tahun 1993

Sekarang, perhatian ditujukan pada kerusakan turap baja dinding dermaga di Pelabuhan Soma akibat Gempa Bumi Tohoku di lepas pantai Pasifik pada tahun 2011, seperti pada foto 2. Dapat dikatakan bahwa kerusakan dinding dermaga terjadi sebagai akibat dari gerakan tanah dan tsunami yang timbul. Akan tetapi, dalam investigasi pasca-bencana, terdapat banyak jejak kerusakan yang disebabkan oleh gerakan tanah yang tidak dapat dipisahkan dari tsunami. Oleh sebab itu berdasarkan perbedaan yang diakibatkan oleh gerakan tanah dan oleh tsunami, akan dapat ditentukan yang menjadi penyebab kerusakan. Perbedaan antara foto 1 dan 2 adalah, sekalipun terjadi tingkat kerusakan yang sama pada kedua dermaga, semua bentuk kerusakan terjadi pada dinding dermaga pada foto 1. Sebaliknya, di pelabuhan Soma, kerusakan hanya terjadi pada sudut dan pada sekitar 30m dari keseluruhan dinding dermaga, sedangkan bagian lainnya cukup baik. Detil proses kegagalan pada saat tersebut tidak diketahui. Saya berencana untuk melakukan upaya untuk menjelaskan proses kegagalan melalui percobaan dan analisa numerik.

Foto 2 Kerusakan pada dinding dermaga turap baja di Pelabuhan Soma selama Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2011

## Ide Konsep Disain Baru yang Mempertimbangkan Efek dari Gempa Bumi dan Tsunami

Standar disain untuk fasilitas pelabuhan di Jepang mengalami revisi pada tahun 2001. Fitur yang paling menonjol dari standar disain baru ini adalah bahwa

disain ini seluruhnya berdasarkan ide “metodologi disain berdasarkan kinerja.” Pada saat bersamaan, standar baru ini didisain untuk peka terhadap kemajuan-kemajuan baru dalam bidang seismologi dan teknik gempa. Berdasarkan standar disain saat ini, lebih baik melakukan investigasi dan mengevaluasi kerusakan dengan mempertimbangkan pembebanan akibat gerakan gempa bumi dan gelombang tsunami selama Gempa Bumi Tohoku lepas pantai Pasifik 2011 serta juga dengan memperbaiki standar disain yang ada.

Ide “metodologi disain berdasarkan kinerja” ini menjadi cikal-bakal standar disain yang baru. Tahap ‘Objektif dari fasilitas’ merupakan tahap pertama dalam proses disain. Kemudian, ‘persyaratan kinerja’ ditentukan dalam “peraturan menteri” untuk mencapai objektif dari fasilitas ini dengan bahasa sederhana sehingga dapat dimengerti oleh pembayar pajak. Ketiga, ‘kriteria kinerja’ ditujukan untuk mencapai persyaratan kinerja dengan menggunakan istilah teknis sehingga dapat diinterpretasikan dengan tepat oleh para insinyur. Akhirnya, kinerja dari fasilitas ini diverifikasi dengan menggunakan ‘metode verifikasi.’

Dari sisi pandang geoteknik, bila kita berfikir bahwa kerusakan fasilitas berulang disebabkan oleh gempa bumi dan tsunami, maka kerusakan yang terjadi dapat disimpulkan sbb.:

- a) Akselerasi respons tinggi, deformasi besar, degradasi material seperti likuifaksi, dan bertambahnya retak yang terjadi
- b) Gaya gelombang tsunami, gaya hidrolis aliran seperti gaya dorong, apung, tumbukan benda-benda melayang selama hantaman tsunami. Khususnya selama tsunami ke arah laut, destabilisasi tekanan air pori tanah akan terjadi, seperti fenomena anjlok, seperti digambarkan pada Gbr. 1 (bawah)

Gbr. 1 Perkiraan Mekanisme Hancurnya Pemecah Gelombang

Saat ini, penyebab kerusakan dan mekanisme kerusakan aktual akibat tsunami belum jelas. Kami sedang meningkatkan percobaan-percobaan dan riset numerik untuk menjelaskan mekanisme kerusakan akibat aksi kombinasi gempa bumi dan tsunami.

Untuk menghasilkan konsep disain baru untuk struktur pantai dengan “disain kokoh” terhadap aksi kombinasi gempa bumi dan tsunami, perlu ditentukan kondisi pembebanan, persyaratan kinerja, kriteria kinerja dan metode verifikasi. Kondisi pembebanan

diringkas dalam Tabel 1, dan kombinasi pembebanan yang tepat perlu dirancang. Dalam hal pemecah gelombang yang kokoh, persyaratan kinerjanya dirangkum dalam Tabel 1. Dalam hal tsunami terbesar, sulit menginterpretasi persyaratan kinerja seperti “dapat dikerjakan” dan “dapat diperbaiki” sebagai kriteria kinerja, dan dalam kondisi sekarang sulit memverifikasi disain dengan akurasi kuantitatif.

Saat ini, kita dapat “mendisain” dengan tsunami yang paling sering terjadi. Sebaliknya, dalam kasus tsunami terbesar, kami hanya mengusulkan “konsep disain.” Setelah belajar dari gempa bumi Hyogoken-Nambu tahun 1995, diperkenalkan konsep gerakan gempa Level 1 dan Level 2, dan dibutuhkan beberapa tahun untuk memperkenalkan ide disain gempa dengan gerakan tanah dua level ini. Dengan demikian, mungkin dibutuhkan beberapa tahun untuk memperkenalkan konsep disain baru tentang aksi kombinasi gempa bumi dan tsunami kepada pemangku kepentingan seperti disainer, pegawai konstruksi, administrator dan lainnya.



(Halaman 6~8)

## **Kerusakan pada Tanggul Sungai dan Langkah-Langkah Restorasi dan Rekonstruksi**

Oleh Ikuo Towhata, Profesor, Dept. Teknik Sipil, Universitas Tokyo

### **Pengantar**

Filosofi konvensional disain gempa untuk tanggul sungai di Jepang sebelumnya hanya berdasarkan konsep faktor keamanan lebih besar dari satu, hampir sama dengan disain struktur lainnya. Akan tetapi, ada dua faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam tanggul sungai. Yang pertama adalah isu finansial bahwa dana yang tersedia untuk perbaikan gempa per satuan panjang terbatas karena keseluruhan panjang tanggul sungai rawan gempa dan substansial. Yang kedua adalah bahwa pertimbangan lebih kecil dari satu tidak berarti langsung terjadi bencana atau limpahan air karena probabilitas terjadinya gempa bumi dan banjir secara simultan dianggap kecil. Akibatnya, faktor keselamatan lebih besar daripada satu tidaklah wajib.

Alternatifnya, kemungkinan kerusakan tanggul sungai diupayakan diperbaiki dalam waktu singkat yang biasanya 14 hari. Untuk tujuan ini, perlu diperkenalkan prinsip disain gempa berdasarkan

kinerja dimana kemungkinan distorsi sebuah tanggul diperiksa berdasarkan gempa disain yang ditentukan, membandingkannya dengan distorsi ijin, dan, apabila yang diperiksa melampaui batas ijin, periksa efek dari langkah-langkah mitigasi. Dalam sudut pandang ini, artikel singkat ini menyampaikan pengalaman dengan tanggul sungai dan kasus-kasus mitigasi kerusakan yang berhasil.

### **Kerusakan Seismik Tanggul Sungai pada Tahun 2011**

Gambar 1 menunjukkan lokasi sungai dan tanggul yang akan didiskusikan dalam artikel ini. Pertama, tanggul Sungai Tone di Sawara (Foto 1) menunjukkan kerusakan tipikal tanggul atau tanggul yang berada di tanah dasar yang mengalami likuifaksi; subsiden pada bagian atas dan retak memanjang yang diakibatkan penyebaran lateral. Seperti banyak kejadian, lokasi sebelumnya merupakan bagian di saluran sungai, yang ditimbun dengan tanah kepasiran secara buatan ataupun alami, sehingga kondisi tanah dasar rawan likuifaksi.

Salah satu kasus yang patut dicatat terlihat pada Foto 2 dimana terjadi distorsi hebat sekalipun tanah dasarnya berlempung dan karenanya tidak terlikuifaksi. Karena deformasi yang dihasilkan berupa subsiden di puncak dan penyebaran lateral yang merupakan kondisi alami deformasi akibat likuifaksi pada suatu tanggul, kerusakan yang ditunjukkan pada Foto 2 dikatakan diakibatkan oleh likuifaksi di dalam badan tanggul. Mekanisme ide baru ini digambarkan seperti di bawah ini, menurut studi yang dilakukan Sasaki et al. (1994)<sup>1)</sup> dan Kaneko et al. (1996)<sup>2)</sup> pada kasus Sungai Tokachi dan Kushiro pada tahun 1993 (Gbr. 3):

- 1) Suatu tanggul Sungai menunjam ke dalam tanah dasar berlempung disebabkan konsolidasi
- 2) Bagian yang menunjam memiliki sistem drainasi buruk sehingga terjadi infiltrasi air hujan dan peresapan air tanah karena elevasinya lebih rendah dari muka tanah, sedangkan tanah sekitarnya adalah lempung yang kurang meluluskan air, dan
- 3) Prosedur subsiden dan ekspansi lateralnya mungkin diikuti penggemburan tanah dan berkurangnya ketahanan likuifaksi

Masalah terkait dengan likuifaksi internal meliputi hal-hal seperti kesulitan deteksi tanggul yang rawan likuifaksi dan drainasi air dari tipe tanggul ini.

Gbr. 1 Lokasi Kerusakan Tanggul yang Dipelajari  
Foto 1 Distorsi tanggul Sungai Tone yang signifikan  
Foto 2 Distorsi signifikan tanggul Hinume

Gbr. 2 Ilustrasi Skematis Mekanisme Likuifaksi di dalam Tanggul

### **Mitigasi yang Berhasil terhadap Kerusakan Tanggul akibat Likuifaksi**

Karena besarnya kekhawatiran akan keselamatan tanggul dalam dekade terakhir, telah dilakukan beberapa langkah-langkah mitigasi. Gempa Bumi Besar Jepang Timur pada tahun 2011 merupakan kesempatan baik untuk melakukan validasi efek mitigasi. Perlu dicatat bahwa upaya mitigasi ditujukan untuk gempa bumi disain Level-1 dimana pengulangan kejadian terjadi sekitar 50 hingga 70 tahun. Sekalipun instalasi drainasi kerikil berhasil di Omigawa, Sungai Tone, dan tiang pasir padat terbukti efektif di Shimo-Nakanome, Sungai Naruse (Gbr. 1), tidak semua detil dapat disampaikan disini karena keterbatasan halaman; lihat Towhat (2012)<sup>3)</sup>.

Di Sakae, Ibaraki, tanggul Sungai Tone diperkuat dengan turap baja bawah tanah (untuk mengurangi rembesan air) dan ditambah berm di sisi sungai. Selama gempa bumi, tidak terjadi distorsi pada sisi sungai (Foto 3). Sebaliknya, sisi darat tanggul mengalami distorsi akibat likuifaksi tanah fondasi dimana muka air tanah hanya sekitar 50 cm dari permukaan (observasi penulis pada bulan April, 2012). Bagian yang rusak direstorasi dengan instalasi turap baja 8-m sepanjang kaki lereng (Foto 4). Lubang pada turap baja memungkinkan rembesan air tanah sehingga muka air tanah pada tanggul dapat diturunkan pada saat muka air di sungai tinggi.

Foto 3 Sisi sungai tanggul Sungai Tone di Sakae tanpa kerusakan (restorasi tanggul secara menyeluruh berlangsung pada bulan April 2012)

Foto 4 Rekonstruksi sisi darat tanggul Sungai Tone dengan instalasi dinding turap baja dengan lubang

### **Analisa Numerik**

Penulis mengusulkan model viskos pasir likuifaksi untuk penilaian kinerja (deformasi) struktur akibat guncangan kuat (Towhata et al., 199 dan 2010)<sup>4)5)</sup> dan mengembangkan sebuah program numerikal. Gbr. 3 adalah sebuah model tanggul untuk analisis contoh, dimana kinerja (penurunan puncak) dimitigasi dengan dinding turap baja tanam, berm pengimbang beban atau keduanya (Gbr. 4). Hasil analisa aliran seperti pada Gbr.5 menunjukkan bahwa gabungan turap baja dan berm pengimbang beban dapat mengurangi subsiden puncak hingga kurang dari 50% setelah guncangan

besar dan aliran tanah selama 20 detik.

Gbr. 3 Model Tanggul dengan Likuifaksi pada Pondasi untuk Analisa Kinerja

Gbr. 4 Dinding Turap Baja dan Berm Pengimbang Beban sebagai Upaya Mitigasi

### Kesimpulan

Artikel ini mengupas kerusakan seismik tanggul selama Gempa Bumi Besar Jepang 2012. Kemungkinan terjadinya likuifaksi di dalam tanggul merupakan salah satu isu penting yang baru. Namun demikian, juga beberapa langkah-langkah mitigasi berhasil baik, seperti dinding turap baja tanam. Akhirnya, penilaian kinerja tanggul akibat likuifaksi sangat mungkin dilakukan dengan menggunakan model cairan viskos.



(Halaman 9~14)

### Kerusakan akibat Likuifaksi terhadap Gedung dan Pipa Kabel Tanam

Oleh Susumu Yasuda, Profesor, dan Keisuke Ishikawa, Asisten, Dept. Teknik Sipil, Universitas Tokyo Denki

Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2012 dengan kekuatan  $M_w=9,0$  terjadi di Lautan Pasifik sekitar 130 km timur laut lepas pantai daratan pulau utama Jepang pada bulan Maret 2011. Likuifaksi terjadi di area reklamasi yang luas sepanjang Teluk Tokyo sekalipun jarak episentrum cukup jauh, sekitar 380 hingga 400 km. Banyak tanah yang direklamasi di Teluk Tokyo sejak abad ke tujuh belas. Likuifaksi sudah terjadi saat gempa bumi sebelumnya, seperti Gempa Bumi Kanto 1923 dan Gempa Bumi Chibaken-toho-oki 1987. Akan tetapi, Gempa Bumi Besar Jepang Timur adalah yang pertama dalam catatan yang mengakibatkan likuifaksi pada area yang luas dan membuat gedung-gedung, pipa-pipa kabel dan jalan-jalan rusak parah.

### Investigasi Lokasi Likuifaksi

Penulis mulai melakukan investigasi area Teluk Tokyo sehari setelah gempa bumi karena semua kereta di Teluk Tokyo tidak berfungsi begitu terjadi gempa bumi hingga tengah malam. Dalam investigasi, jalan dimana terlihat maupun tidak terlihat pasir buih (*boiled sand*) ditandai di peta (Gbr. 1). Zona yang dikelilingi garis merah berarti mengalami likuifaksi, namun

ternyata ada beberapa distrik kecil yang tidak mengalami likuifaksi karena tanahnya sudah diperbaiki dengan metoda pemadatan pasir atau metoda lainnya yang akan disebut berikutnya. Sehingga keseluruhan dibutuhkan sekitar sepuluh hari untuk melakukan investigasi seluruh area dari Odaiba di Tokyo hingga Kota Chiba melalui kota-kota Urayasu, Ichikawa dan Narashino. Pada tahap awal investigasi ini dibuat peta tentative zona likuifaksi (Yasuda dan Harada, 2011)

Karena seriusnya kerusakan bangunan, alur sungai, jalan, pipa kabel dan pelabuhan, Biro Pengembangan Wilayah Kanto, Kementerian Pertanahan, Infrastruktur, Transport dan Pariwisata bermaksud melakukan riset bersama dengan JGS untuk mengidentifikasi lokasi likuifaksi. Gbr. 2 adalah peta zona likuifaksi yang diperkirakan, yang sedikit dimodifikasi dari peta tentatif.

Gbr. 1 Metode untuk Menentukan Zona Likuifaksi dan Non-Likuifaksi

Gbr. 2 Area Likuifaksi dari Odaiba di Tokyo ke Kota Chiba

### Kondisi Tanah di Area Likuifaksi

Sebagaimana ditunjukkan dalam Gbr. 2, area likuifaksi yang parah akibat gempa bumi adalah dari Shinkiba di Tokyo ke Kota Chiba melalui kota-kota Urayasu, Ichikawa, Funabashi dan Narashino di Prefektur Chiba. Lahan reklamasi di area ini dibangun sesudah tahun 1966. Dalam pekerjaan reklamasi, dilakukan penimbunan tanah hasil keruk dari dasar laut ke ketinggian sekitar muka laut. Kemudian permukaan timbunan ditutup dengan pasir bukit. Gbr. 3 menggambarkan proses pengerukan. Tanah dari dasar laut diekskavasi dengan alat penggali (*cutter*), disedot dengan air dengan menggunakan sebuah pompa, diangkut dengan pipa berjalan, kemudian dikeluarkan dari *exit*. Karena tanah keruk mengandung banyak air, butiran tanah kasar dan butiran tanah halus, maka ada kecenderungan untuk mengendap dekat mulut pipa ataupun jauh dari *exit*. Lebih jauh lagi, posisi *exit* berpindah-pindah, dan menghasilkan ketinggian yang tidak homogen. Setelah penimbunan dengan tanah keruk dan penutupan dengan pasir bukit, tidak dilakukan pekerjaan perbaikan kecuali beberapa area khusus dimana diterapkan metoda-metoda tiang pasir padat atau tiang drainasi kerikil metoda lainnya untuk mencegah likuifaksi

Dengan diterbitkannya tiga set *data base* oleh JGS, Prefektur Chiba dan Pemerintah Kota Metropolitan

Tokyo di daerah likuifaksi, penulis membuat perkiraan potongan melintang tanah sepanjang 11 jalur yang tegak lurus dengan garis pantai berdasarkan data ini. Gbr. 4 menunjukkan perkiraan potongan melintang sepanjang sebuah jalur di Urayasu 3-3' bersama dengan zona dimana ditemukan *sand boiling*. Zona dimana terjadi *sand boiling* bertepatan dengan area lahan reklamasi yang merupakan sisi laut dari dinding laut lama. Dalam zona reklamasi, suatu lapisan timbunan yang terdiri dari pasir bukit (B) dan sebuah lapisan timbunan tanah keruk kepasiran (F) dengan *N-values SPT* sebesar 2 sampai 8 diendapkan dengan ketebalan 6 hingga 9 m. Di dasarnya terdapat lapisan alluvial dengan *N-values* sebesar 10 sampai 20 dengan ketebalan 4 hingga 5 m. Satu lapisan lempung alluvial yang sangat halus (Ac) diendapkan di bawah lapisan  $A_S$  dengan ketebalan 10 hingga 40 m, dengan meningkatkan ketebalan ke arah laut. Di bawahnya, terdapat lapisan kepasiran Diluvial yang padat (Ds) dengan *N-value SPT* lebih dari 50. Muka air tanah dangkal karena GL  $-0.5$  m to  $-3$  m dan semakin ke arah laut kedalamnya berkurang. Sebaliknya, di zona dimana tidak terlihat *sand boiling*, lapisan  $A_S$  mengendap dari permukaan tanah. Oleh karena itu dapat diestimasi bahwa lapisan  $A_S$  pada dasarnya tidak terlikuifaksi waktu Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2011 walaupun bagian lepas (*loose*) mungkin terlikuifaksi di daerah reklamasi, dan sebagian tanah keruk kepasiran di bawah muka air tanah mungkin terlikuifaksi. Pada 10 potongan melintang lainnya komposisi lapisan tanah serupa, sekalipun ketebalannya berbeda.

Sebuah komite teknis di bawah Pemerintah Kota Urayasu yang diketuai oleh Prof. K. Ishihara melakukan insvestigasi tanah secara detil di musim panas dengan pengeboran, SPT, CPT, PS logging dan sampel tak-terganggu, uji triaksial siklik dan lainnya, dan melaporkan perolehan data pentingnya pada bulan Desember 2011. Distribusi frekuensi *normalized SPT N-values*,  $N_1$  dan isi butiran halus (*finer content*),  $F_c$  lapisan F dan lapisan  $A_S$  dibandingkan di Gbr. 5 (1) sampai (4). *Fines content* lapisan F sangat tersebar dan lebih besar daripada *finer content* lapisan  $A_S$ , sekalipun lapisan F pada dasarnya diambil dari lapisan  $A_S$ . Perbedaan ini pastilah sebagai akibat kurangnya tanah alluvial kepasiran untuk reklamasi. Karena zona keruk berada tepat di atas sebuah delta yang terbentuk oleh Sungai Edo, tanah kepasiran tidak mencukupi untuk penimbunan sehingga kemudian digali tanah lempung dan dicampur dengan tanah alluvial kepasiran. Nilai rata-rata *finer content* lapisan F sangat tinggi mencapai

43.8 %. Akan tetapi, Indeks Plastisitasnya,  $I_p$ , tidak tinggi walaupun *finer contentnya* besar.  $N_1$  lapisan F jelas lebih rendah dari pada lapisan  $A_S$ . Sampel tak-terganggu diambil di sembilan lokasi untuk mendapatkan kuat geser siklis dan modulus geser. Distribusi frekuensi rasio tegangan geser yang mengakibatkan likuifaksi dalam 20 siklus diuji dengan uji triaksial siklis,  $R_L$  ( $N_L=20$ ,  $DA=5\%$ ) untuk lapisan F dan  $A_S$ , ditunjukkan dalam Gbr. 6. Nilai  $R_L$  dominan untuk lapisan F dan  $A_S$  adalah masing-masing 0,25 hingga 0,30 dan 0,30 hingga 0,40 sekalipun datanya sangat menyebar di lapisan F. Oleh karenanya, dapat dikatakan bahwa tanah pada lapisan F lebih mudah terlikuifaksi dibandingkan dengan tanah pada lapisan  $A_S$

Gbr. 3 Proses Pekerjaan Pengerukan

Gbr. 4 Estimasi Potongan Melintang Tanah

Gbr. 5 Distribusi Frekuensi  $N_1$  dan  $F_c$  untuk Tanah Keruk dan Pasir Aluvial

Fig. 6 Distribusi Frequency Shear Stress Ratio yang Menyebabkan Likuifaksi

### Proses Likuifaksi

Karena gempa bumi terjadi pada jam 14:46 Jumat sore, banyak foto dan film yang diambil sepanjang lokasi di Teluk Tokyo yang dapat digunakan untuk dipelajari. Di antaranya adalah sejumlah foto yang diambil di 3-chome di Kota Urayasu oleh Mr. Katsunori Ogawa tepat setelah gempa yang ditunjukkan dalam Foto 1 (A~D):

<<<< Guncangan akibat gempa utama mulai pukul 14:47 di Urayasu >>>>

**A** <14:56>: Muntahan air berlumpur bermula ke arah timur laut. Diperlukan beberapa menit untuk mulai berbuih setelah gempa utama selesai

**B** <15:01>: Air lumpur berbuih perlahan-lahan menyebar dan menutupi jalan

<<<< Sebuah gempa susulan menghantam Urayasu pada pukul 15:16 >>>>

**C** <15:21>: Jalan barat daya tertutup penuh oleh air berlumpur. Pipa air terlihat mulai pecah.

**D** <15:22>: Banyak rumah anjlok dan miring dan mobil-mobil tenggelam dalam air lumpur berbuih.

Para penulis mengirimkan kuesioner ke sekitar 30 penduduk di distrik Irifune yang juga berada di Kota Urayasu untuk menanyakan waktu *boiling* dan tinggi air lumpur berbuih. Jawaban yang diterima diringkaskan dalam Gbr. 7. Sekitar 1/3 orang mengamati *boiling* air berlumpur sesaat setelah gempa utama, namun 1/3

orang mengenali mutahan air berlumpur 5 hingga 9 menit setelah gempa utama. Orang-orang lainnya menyaksikan air berlumpur pada waktu yang berbeda. Tinggi air berlumpur tidaklah tinggi karena biasanya kurang dari 9 cm setelah gempa utama. Sekitar 2/3 orang menyatakan bahwa *boiling* air berlumpur berlanjut hingga gempa susulan, dan sekitar 3/4 orang mengamati air menutupi hingga gempa susulan. Sebaliknya, sekitar 3/4 orang menyaksikan lontaran air berlumpur tepat setelah gempa susulan dan ketinggian airnya jelas lebih besar dibandingkan ketinggian setelah gempa utama. Ini berarti proses *boiling* meningkat akibat gempa susulan dan likuifaksi pada beberapa lokasi terjadi lebih parah selama gempa susulan. Pertanyaan mengenai waktu penurunan rumah merupakan pertanyaan yang sulit untuk dijawab. Akan tetapi, 1/3 orang dan 1/3 orang lagi menjawab bahwa penurunan rumahnya adalah nol dan 10 hingga 19 cm, masing-masing setelah gempa utama. Dan, banyak penduduk yang baru menyadari penurunan rumahnya keesokan harinya.

Berdasarkan hasil dengar pendapat di distrik Imagawa, beberapa penduduk bersaksi bahwa *boiling* tidak terjadi selama gempa utama tetapi setelah gempa susulan.

Foto 1 Foto urutan kejadian

Gbr. 7 Kuesioner bagi Penduduk di Irifune

### Efek Panjang Durasi Gempa terhadap Likuifaksi

Gbr. 8 menunjukkan akselerasi permukaan tanah selama gempa utama dan gempa susulan. Akselerasi permukaan tidak tinggi karena sebesar  $160 \text{ cm/s}^2$  hingga  $230 \text{ cm/s}^2$  sekalipun terjadi likuifaksi parah. Akselerograf, yang direkam di K-NET Inage di Chiba dimana terlihat *sand boiling* sangatlah penting karena dapat digunakan untuk menentukan waktu likuifaksi dari gelombang yang terrekam. Gbr. 9 menunjukkan akselerograf di Inage bersama dengan yang di K-NET Urayasu yang direkam di atas tanah yang tidak mengalami likuifaksi. Kedua rekaman mulai hampir bersamaan; 14:46:16 di Inage dan 14:46:15 di Urayasu. Pada gelombang Urayasu, frekuensi tidak berubah drastis setelah akselerasi puncak yang timbul setelah sekitar 118 detik. (14:48:13). Sebaliknya, frekuensi berubah ke angka rendah setelah dua puncak pada detik 120. (14:48:16) dan detik 126. (14:48:22). Oleh karena itu, dapat ditentukan bahwa likuifaksi terjadi sekitar 14:48:16 ke 14:48:22 di K-NET Inage. Ini berarti banyak siklus tegangan geser, sekitar 20 siklus dari 110

detik, yang dapat mengakibatkan likuifaksi di lokasi K-NET. Dan perlu dicatat guncangan masih berlangsung untuk waktu lama setelah likuifaksi. Dengan mengacu kepada akselerograf di K-NET Urayasu, guncangan pada muka tanah di Inage berlanjut 3 menit setelah likuifaksi.

Salah satu dampak terhadap muka tanah adalah guncangan setelah gempa susulan. Akselerasi puncak selama gempa susulan besarnya hampir setengah akselerasi selama gempa utama di Teluk Tokyo seperti digambarkan dalam Gbr. 8. Namun demikian, sebagaimana disebut di atas, di beberapa lokasi *boiling* terjadi setelah gempa susulan. Oleh karena itu, alasan utama terjadinya likuifaksi parah semestinya merupakan efek durasi guncangan yang panjang selama gempa utama dan gempa susulan. Penulis mencoba uji geser torsi siklis dan analisa sederhana untuk mengevaluasi efek lama guncangan terhadap terjadinya likuifaksi. Dua jenis gelombang geser diberikan pada specime; gelombang sinus dengan 20 siklus dan gelombang gempa yang terrekam selama gempa utama dan gempa susulan di K-NET Urayasu. Dalam hal gelombang gempa, tekanan air pori eksese meningkat bertahap terhadap tegangan geser seperti digambarkan pada Gbr. 10. Kemudian, hubungan antara rasio tegangan  $R (\tau_d/\sigma')$  untuk gelombang sinus atau  $R_{\max} (\tau_{\max}/\sigma')$  untuk gelombang gempa dan tekanan air pori eksese residual  $u/\sigma_c'$  diplot di Gbr. 11. Karena  $R=0.27$  untuk  $u/\sigma_c'=1.0$  dan  $R_{\max}=0.31$  untuk  $u/\sigma_c'=1.0$ , faktor koreksi  $C_w$  berdasarkan standar JRA (2002) menjadi 0.82. Kemudian faktor keamanan terhadap likuifaksi  $F_L$  dan potensial likuifaksi  $P_L$  dievaluasi dengan untuk tiap data *boring* yang digunakan untuk estimasi 11 brief soil cross section, dengan kondisi  $C_w=0.82$  dan 1.0. Dalam estimasi,  $R_L$  diestimasi dari SPT N-values dan  $F_c$ , dengan menggunakan rumus yang diusulkan oleh komite teknis Kota Urayasu. Gbr. 12 menunjukkan nilai evaluasi  $F_L$  untuk data *boring* di Urayasu dimana terjadi likuifaksi. Bila  $C_w$  diasumsikan 1.0, semua  $F_L$  diestimasi lebih besar daripada 1.0 dimana  $F_L$  lebih kecil daripada bila  $C_w$  diasumsikan 0.82. Gbr. 13 membandingkan  $P_L$  untuk semua data *boring* dengan asumsi  $C_w=0.82$  dan  $C_w=1.0$ . Bila  $C_w=0.82$ ,  $P_L$  untuk lokasi terlikuifaksi dihitung lebih besar dari pada sekitar 10 dan keparahan likuifaksi dapat ditampilkan.

Gbr. 8 Perbandingan Akselerasi selama Gempa Utama dan Gempa Susulan oleh K-NET

Gbr. 9 Perbandingan Akselerasi yang Terrekam di K-NET Inage and Urayasu

Gbr. 10 *Time History* Tegangan Geser, Regangan Geser dan Tekanan Air Pori Ekses

Gbr. 11 Hubungan antara Rasio Tegangan Geser dan Tekanan Air Pori Ekses

Gbr. 12 Analisis  $F_L$  di Imagawa di Kota Urayasu

Gbr. 13 Efek  $C_w$  terhadap  $P_L$

### Penurunan dan Pemiringan Rumah

Berdasarkan hasil keseluruhan dari Kementerian Pertanahan, Infrastruktur dan Pariwisata, sekitar 27.000 rumah rusak akibat likuifaksi (Tabel 1). Foto 2 (1~2) menunjukkan sebuah rumah yang rusak yang diambil dari luar dan dalam rumah. Rumah tersebut turun dan miring sekitar 40/1.000. Dalam rumah yang miring parah, penghuni merasa pusing dan mual dan sulit tinggal di dalam rumah mereka setelah gempa bumi. Akan tetapi, rumah yang rusak akibat likuifaksi dinilai mengalami kolaps atau rusak parsial hanya selama gempa bumi yang lalu karena tidak ada kerusakan pada dinding dan jendela, walaupun tetap diperkirakan ada penurunan dan pemiringan.

Kemudian, di bulan Mei, Kabinet Jepang mengumumkan standar evaluasi yang baru untuk kerusakan rumah berdasarkan kedua faktor; penurunan dan pemiringan, seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Jumlah rumah rusak di Kota Urayasu menurut standar yang baru dimasukkan dalam list Tabel 3 bersama dengan jumlah yang dihitung dengan metoda lama (Kota Urayasu, 2011). Jumlah rumah yang rusak sebagian maupun rusak total meningkat drastis, dan jumlah rumah rusak lebih parah dari pada hancur sebagian meningkat menjadi 3.680.

Seperti disebut di atas, terjadinya likuifaksi tentunya dipengaruhi oleh gempa susulan. Bukan hanya terjadinya likuifaksi tetapi juga penurunan dan pemiringan yang dipengaruhi oleh gempa susulan. Tinggi muka air tanah meningkat setelah gempa utama dan air lumpur berbuih menutupi permukaan tanah setelah gempa susulan pada beberapa lokasi. Kemudian, penurunan rumah-rumah terjadi selama gempa susulan walaupun amplitudo guncangan lebih kecil daripada selama gempa utama seperti ditunjukkan pada Gbr. 14 secara skematis.

Banyak penduduk sepanjang Teluk Tokyo menghadapi masalah serius, bagaimana merestorasi rumahnya yang rusak. Problem akan menjadi rumit bila terjadi re-likuifaksi selama gempa susulan atau gempa bumi masa depan. Yang perlu dilakukan tidak hanya restorasi saja tetapi juga penerapan langkah-langkah menghadapi likuifaksi ulang, dan untuk tanah dengan

struktur eksisting. masalahnya adalah biaya dan teknik pengolahan yang bisa diterapkan. Sebelumnya pengembangan penanganan yang ekonomis dan efektif terhadap likuifaksi untuk rumah kayu telah dilakukan oleh beberapa organisasi. Sementara ini sedang dikaji beberapa penerapan penanganan khusus dengan penurunan muka air tanah untuk perbaikan areal.

Tabel 1 Jumlah Rumah Rusak akibat Likuifaksi

Foto 2 Rumah-rumah yang mengalami penurunan dan pemiringan yang parah di Kota Urayasu.

Tabel 2 Standar Evaluasi Baru untuk Kerusakan Rumah

Tabel 3 Jumlah Rumah Rusak di Kota Urayasu berdasarkan Standar Lama dan Baru

Gbr. 14 Efek yang Mungkin dari Gempa Susulan terhadap Penurunan Rumah

### Kerusakan Saluran Limbah dan Lurang akibat *Sloshing* Tanah Likuifaksi

Fenomena ajaib, *heaving*, tekuk atau *thrust* terjadi di beberapa jalan setapak dan gang Teluk Tokyo seperti pada Foto 3. Gbr. 16 menunjukkan terangkatnya jalan setapak atau gang di Kota Urayasu dan garis kontur ketebalan lapisan F di bawah muka air tanah. Dapat dikatakan bahwa *heaving* terjadi di lokasi dimana dasar lapisan F yang terlikuifaksi menjadi miring. Implikasinya adalah, kemungkinan terjadi tekuk horizontal permukaan lapisan akibat konsentrasi tegangan tekan horizontal seperti digambarkan pada Gbr. 15 (2). Akan tetapi, masih dibutuhkan banyak studi mengenai mekanisme tekuknya.

Dalam hal fasilitas pembuangan limbah, pipa-pipa membengkok, sambungan terlepas dan pipa terisi air berlumpur. Banyak lurang yang terbelah pada arah horizontal dan terisi dengan air berlumpur dan beberapa lurang juga terangkat. Walaupun mekanisme kerusakan unik ini masih dipelajari, salah satu pemikiran penulis dituangkan dalam Gbr. 17. Seperti disebut di atas, *sloshing* tanah likuifaksi dapat terjadi akibat durasi lama guncangan dan menyebabkan *thrust* pada jalan. Dengan gerakan yang sama pada tanah, pipa dapat membengkok serampangan pada arah horizontal, yang mengakibatkan terputusnya atau terlepasnya sambungan, dan akhirnya air berlumpur masuk ke dalam pipa. Lurang dapat terbelah akibat gaya horizontal dan air berlumpur bertekanan masuk ke dalam lurang. Untungnya, atau sebaliknya, masuknya air berlumpur ke dalam pipa limbah dan lurang dapat mencegah gaya angkat (*uplift*).

Foto 3 *Heaving* pada jalan setapak di Takahama, Ichikawa

Gbr. 15 Dua Mekanisme *Heaving* yang Mungkin

Gbr. 16 Jalan Setapak atau Gang yang Terangkat di Kota Urayasu dan Garis Kontur Ketebalan Lapisan F di bawah Muka Air Tanah

Gbr. 17 Kerusakan Unik pada Lurang dan Pipa

### **Masalah Lalu Lintas akibat *Boiled Sand* dan Subsiden**

Pada area likuifaksi terjadi banyak erupsi pasir dan subsiden besar muka tanah. Ketebalan maksimum pasir erupsi dan subsiden permukaan maksimum yang teramati oleh penulis adalah masing-masing sekitar 30 cm dan 50 cm. Ini merupakan pengalaman pertama bagi para penulis melihat endapan *boiled sand* yang begitu tebal di Jepang. Akan tetapi, salah satu penulis pernah melihat erupsi serupa dan subsiden besar di Christchurch selama gempa utama pada September 2010 dan gempa susulan pada Februari 2011. Gbr. 18 membandingkan kurva distribusi ukuran butiran tanah erupsi di Christchurch selama gempa utama dengan yang di Teluk Tokyo selama gempa bumi ini. Isi butiran halus di Christchurch dan Teluk Tokyo serupa. Oleh karenanya diperkirakan bahwa pada pasir sangat halus, keluarnya air berlangsung lama karena permeabilitas tanah likuifaksi yang rendah di ke dua area. Lebih lagi, partikel halus tanah mudah terangkat ke atas permukaan tanah dengan keluarnya air. Pembuangan tanah endapan oleh penduduk mempercepat penurunan permukaan tanah

Foto 4 menunjukkan sebuah gang yang tertutup oleh *boiled sand*. Sulit untuk bergerak di atas endapan pasir basah dengan mobil ataupun sepeda. Terlebih penurunan tanah yang besar di sekitar bangunan tidak memungkinkan untuk ke luar ke parkir.

Gbr. 18 Perbandingan Kurva Distribusi Ukuran Butir *Boiled Sands* di Tokyo dan Christchurch

### **Kesimpulan**

Likuifaksi parah terjadi di area Teluk Tokyo pada saat Gempa Bumi Besar Jepang Timur 2011. Intensitas seismik di zona likuifaksi tidak tinggi, sekalipun permukaan tanah likuifaksi tertutup oleh *boiled sands*. Durasi yang sangat panjang gempa utama dan gempa susulan 29 menit kemudian tentunya telah mengakibatkan likuifaksi parah. Banyak rumah yang turun banyak dan sangat miring akibat likuifaksi. Pipa pembuangan limbah berbelok-belok atau patah,

sambungan tercerabut dari tanah, dan pipa terisi dengan air belumpur. Banyak lurang yang terbelah horizontal dan terisi air berlumpur, sedangkan beberapa lurang terangkat. Kerusakan besar pada pipa tanam dan lurang mungkin terjadi akibat *sloshing* permukaan tanah likuifaksi

### **Ucapan Terima Kasih**

Beberapa hasil yang dikutip dalam teks ini diambil dari laporan Komite Teknik Penanganan Likuifaksi yang diketuai oleh Prof. K. Ishihara dibawah Pemerintah Kota Urayasu. Mr. K. Ogawa memberikan kami foto-foto penting. Para penulis mengucapkan penghargaan yang tinggi kepada mereka.



(Halaman 15~17)

### **Pengolahan Debris dan Endapan Tsunami, dan Pemanfaatan Efektifnya untuk Restorasi dan Rekonstruksi**

Oleh Takeshi Katsumi, Professor, Universitas Kyoto Sekolah Tinggi Studi Lingkungan Global

Gempa Bumi Besar Jepang Timur pada Bulan Maret 2011 membangkitkan tsunami yang menghasilkan debris dan endapan, oleh karenanya pengolahan yang tepat merupakan tugas utama dalam rekonstruksi dan restorasi area bencana. Di tiga prefektur yang terkena bencana Iwate, Miyagi dan Fukushima, material ini melebihi 22 juta ton. Di Prefektur Iwate, contohnya, dikatakan bahwa limbah yang dihasilkan dalam sekali gempa bumi ekuivalen dengan akumulasi normal 11 tahun. Foto 1~3 menunjukkan endapan tsunami yang ditumpuk di ladang padi, penyimpanan sementara terutama untuk endapan tsunami dan tempat untuk limbah campuran.

Foto 1 Endapan Tsunami (*courtesy*: T. Yasutaka)

Foto 2 Lokasi penyimpanan sementara terutama untuk endapan tsunami

Foto 3 Lokasi penyimpanan sementara untuk limbah bencana campuran

### **Pedoman untuk Pengolahan dan Daur Ulang Debris dan Endapan Tsunami**

Pengolahan debris dan endapan tsunami perlu dilakukan dari dua perspektif: kapasitas proses pengolahan area terkena bencana dan struktur masyarakat yang berorientasi daur-ulang yang sedang

ditingkatkan di Jepang. Dengan demikian ada dua jalur utama pengolahan yang diikuti: yang pertama adalah pemisahan dan proses terkait yang dibutuhkan untuk mendaur-ulang serta pemanfaatan efektif debris dan endapan tsunami yang sayangnya tidak dapat didaur-ulang. Kedua cara ini dituangkan dalam kebijakan nasional segera setelah gempa bumi terjadi, Peran sektor konstruksi dan rekonstruksi-operasi menjadi penting dalam meningkatkan pemanfaatan efektif debris dan endapan tsunami.

Dalam hal ini, dua pedoman sudah dibuat oleh Kementerian Pertanahan, Infrastruktur, Transport dan Pariwisata dimana penulis turut berperan serta —yaitu, "*Pedoman Teknis mengenai Perbaikan Taman dan Jalur Hijau yang Termasuk dan Rekonstruksi Terkait Gempa Bumi Besar Jepang Timur*," dan "*Konsep Dasar untuk Penggunaan Material Daur-Ulang untuk Timbunan dalam Pengembangan Petak Gedung: Material Kondusif untuk Rekonstruksi dan Restorasi Segera (Pedoman untuk Penimbunan Material dalam Pengembangan Petak Gedung*. Kedua pedoman ini menawarkan konsep dasar untuk perbaikan taman dan untuk menaikkan tanah yang tenggelam dengan penggunaan optimum berbagai material daur-ulang dari limbah bencana

### Endapan Tsunami

Diantara berbagai jenis debris dan material limbah yang dihasilkan bencana terdapat sejumlah besar tanah dan pasir yang disebut endapan tsunami. Karenanya, apabila endapan ini akan digunakan untuk material konstruksi dan rekonstruksi, perlu memisahkan tanah, pasir dan endapan serupa dari material lainnya. Banyak jenis endapan tsunami dengan properti fisik yang beragam. Contohnya, distribusi butiran endapan tsunami yang menumpuk di ladang padi memiliki kandungan lanau yang tinggi, dan mengakibatkan level distribusi berada di luar rentang butiran yang sesuai seperti ditunjukkan dalam *Manual untuk Pekerjaan Tanah di Sungai* yang sering digunakan. Tetapi, distribusi butiran tanah dan pasir yang terkandung dalam endapan tsunami yang ditumpuk dalam tempat penyimpanan sementara dapat diterima (Gbr. 1)<sup>1,2)</sup>.

Satu hal yang perlu diperhatikan dalam aplikasi praktis tanah/pasir endapan tsunami adalah salinitas. Gbr. 2 menunjukkan hasil pengukuran kandungan klorida dalam endapan tsunami di ladang padi sebuah komunitas pantai setempat di Prefektur Fukushima. Pengukuran dilakukan dengan mengambil 38 spesimen

dari ladang padi pada Desember 2011. Kandungan Klorida dari dua per tiga 38 spesimen adalah 2 mg/g atau kurang, sementara jumlah spesimen yang mengandung Klorida 1 mg/g atau kurang ada pada sepertiga, atau 13 spesimen<sup>1)</sup>. Secara konvensional, kandungan klorida material pekerjaan tanah dibatasi 1mg/g atau kurang untuk mencegah korosi pada tiang pancang pipa baja dan produk baja lainnya yang dipasang di bawah tanah. *Pedoman untuk Penimbunan Material dalam Pengembangan Petak Gedung* mengikuti arahan ini. Akan tetapi, bila endapan tsunami ini dipertimbangkan untuk digunakan untuk menaikkan tanah yang tenggelam sepanjang pantai, maka penggunaan tanah dan pasir yang mengandung klorida lebih dari yang ditentukan menjadi rasional karena tingginya salinitas air di bawahnya. *Pedoman* ini menyiratkan aplikasi demikian.

Gbr. 1 Endapan Tsunami yang Dikumpulkan di Ladang Padi (atas) dan Endapan Tsunami dan Tanah yang Diangkut dan Ditumpuk di Lokasi Penyimpanan Sementara (bawah)

Gbr. 2 Salinitas Endapan Tsunami

### Debris dan Limbah

Seperti ditunjukkan dalam Gbr. 3, debris dan limbah harus melalui pemilahan kasar awal, dan kemudian ke pengolahan sekunder yang terdiri dari proses penghancuran, pemurnian, pemisahan basah atau kering, dan pemilahan manual. Uji dilakukan pada spesimen tanah dan pasir pada beberapa lokasi sementara dan lokasi pemilahan sekunder. Hasil uji menunjukkan bahwa kinerja pemadatan yang tinggi dapat dihasilkan bila dilakukan pembersihan dari potongan kayu dan kotoran lainnya (Gbr. 4)<sup>2)</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan bahan organik harus diverifikasi agar berada dalam batas ijin, mengingat potensi terjadinya subsiden jangka panjang yang diakibatkan oleh dekomposisi bahan organik, dan juga pengolahan sekunder harus dilakukan dengan benar.

Karena penerapan pengolahan mutakhir akan meningkatkan kualitas, adalah beralasan untuk menerapkan secara selektif tingkat pengolahan yang tepat untuk mencapai kualitas yang disyaratkan untuk volume tertentu. Dalam hal ini, kami sudah mengusulkan pendekatan pengolahan strategis seperti ditunjukkan dalam Gbr. 5<sup>3)</sup>.

Gbr. 3 Alur Tipikal Pengolahan Limbah Bencana

Gbr. 4 Karakteristik Pemadatan Tanah Terpisah  
 Gbr. 5 Gambar Pendekatan Pengolahan Strategis dengan Pertimbangan Kualitas yang Dibutuhkan untuk Tujuan Aplikasi dan Jumlah Aplikasi Efektif

**Utilisasi Efektif Limbah Bencana**

Keberadaan logam berat alami di area Tohoku, tempat terjadinya gempa bumi, telah dibicarakan sebelumnya. Dari survei yang kami lakukan, ditemukan bahwa endapan tsunami melarutkan arsenik dan fluorin dengan kecepatan melebihi standar lingkungan (Tabel 1)<sup>4)</sup>. Dengan kenyataannya bahwa endapan-endapan ini mengandung tanah dan pasir yang tidak umum bagi tanah setempat, dibutuhkan penanganan yang sesuai berdasarkan asesmen resiko yang tepat untuk pemanfaatan endapan tsunami ini. Tugas lainnya adalah bagaimana menanggapi bahan asbestos dan bahan bahaya lainnya yang terdapat dalam struktur yang hancur dan juga bahan radioaktif.

Sementara itu, teknologi pelacakan, yang menggunakan *electronic toll collection system (ETC)* dan terminal informasi ponsel, tengah diterapkan dalam pengontrolan limbah. Untuk dapat memanfaatkan limbah bencana secara efektif, aplikasinya perlu dipromosikan di lokasi-lokasi publik dan pada saat yang sama juga perlu didiskusikan pengolahannya dan utilisasi efektifnya berdasarkan penilaian yang cermat mengenai resiko sejalan dengan konsensus sosial. Dengan sains dan teknologi sangat diharapkan kondisi iklim dapat dicermati secara optimal dan sumberdaya yang terbatas dapat digunakan dengan efektif dan bijak.

Tabel 1 Contoh Properti Endapan Tsunami



(Halaman 18)

**Teknologi Aplikasi Baja**

**Detil Dasar tentang Korosi dan Proteksi Korosi**

Oleh Hidenori Hamada, Profesor, Dep. Teknik Sipil dan Struktur, Universitas Kyushu

**Korosi**

Korosi material logam merupakan fenomena yang terjadi dimana terjadi perubahan permukaan akibat reaksi kimia atau reaksi elektrokimia ketika material

logam dipaparkan pada lingkungan berbeda selama penggunaannya.

Korosi diklasifikasikan ke dalam dua jenis: korosi kering dan korosi basah. Korosi kering terjadi ketika suatu material logam terkena temperature tinggi dalam kondisi kurang lembab dan timbul terutama karena interaksi dengan satu gas atau lebih. Korosi basah timbul karena ionisasi logam dalam kondisi dimana terdapat kelembaban. Di samping korosi yang diakibatkan ionisasi alami, korosi basah juga meliputi korosi yang disebabkan oleh arus listrik bebas.

Lebih jauh lagi, korosi juga diklasifikasikan sebagai korosi umum atau korosi setempat. Korosi umum, menunjukkan bahwa material logam tersebut terkorosi secara merata dan terjadi dalam kasus-kasus dimana kondisi lingkungan hampir identik diseluruh permukaan logam. Sebaliknya, korosi setempat menunjukkan bahwa korosi tidaklah seragam, bahwa ada korosi lubang dalam yang dalam atau korosi beralur, dan bahwa penyebab korosi adalah tidak meratanya distribusi faktor lingkungan, tidak seragamnya kualitas material, atau aksi galvanis (kontak dengan logam lain).

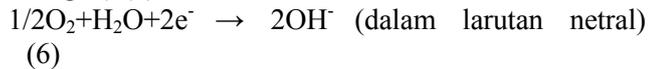
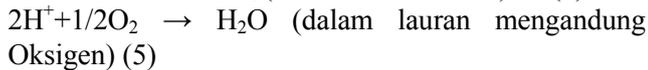
Foto 1 menunjukkan korosi setempat yang terjadi pada turap baja dan tiang pancang pipa baja yang digunakan untuk struktur pelabuhan. Struktur yang mengalami korosi setempat berada dalam situasi bahaya.

Foto 1 Korosi setempat yang terjadi pada struktur pelabuhan: turap baja (kiri) dan tiang pancang pipa baja (kanan)

**Mekanisme Korosi**

Observasi mikro permukaan produk-produk baja menunjukkan bahwa terdapat ketidak-seragaman dalam hal kualitas produk baja, seperti ketidak-seragaman ukuran pabrik dan kekasaran permukaan. Lebih jauh lagi, potensial listrik pada permukaan produk baja mungkin tidak seragam akibat kondisi lingkungan yang tidak merata pada permukaan baja, seperti perbedaan dalam hal kondisi kelembaban (mengeringkan dan membasahi). Sebagai akibatnya, area anodik dan katodik terbentuk pada permukaan (Gbr. 1). Rumus kimia reaksi korosi baja dinyatakan sbb.:

- Reaksi anodik
  - $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  (1)
  - $Fe^{2+} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$  (2)
  - $4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$  (3)
- Reaksi Katodik



Dalam kondisi dimana terdapat air dan oksigen bersamaan, ion besi ( $\text{Fe}^{++}$ ) melarut akibat reaksi anodic (Rumus 1), sementara ion hidroksida ( $\text{OH}^-$ ) dihasilkan akibat reaksi katodik (Rumus 4~6). Ini merupakan tahap pertama pembentukan sel korosi. Berikutnya,  $\text{Fe}^{++}$  dan  $\text{OH}^-$  saling mengikat (Rumus 2) dan membentuk  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , yang kemudian teroksidasi dengan oksigen terlarut untuk menghasilkan karat (korosi) (Rumus 3).

Untuk mendemonstrasikannya, benda uji baja (A1, B1, A2, B2 dan C) ditempatkan dalam dua lingkungan berbeda: lempung dan pasir (lihat Gbr. 2). Ketika benda uji A1 dan B1 ditanam seperti dalam gambar, area anodik dan katodik akan segera terlihat pada permukaan dan kemudian akan terbentuk sel korosi mikro. Dalam hal ini, area anodik dan katodik yang membentuk sel korosi mikro terus berubah posisinya sejalan dengan kemajuan reaksi korosi dan pada akhirnya menghasilkan korosi yang umum terjadi pada baja. Sebaliknya, ketika yang ditanam adalah benda uji tunggal yang dipaparkan serentak pada dua lingkungan berbeda (pasir dan lempung) seperti benda uji C, atau ketika dua benda uji dalam lingkungan berbeda terhubung listrik (benda uji A2 dan B2 dalam gambar), terbentuk sel korosi makro. Dalam pembentukan sel korosi dalam lingkungan berbeda, maka lingkungan dengan konsentrasi oksigen terlarut yang relatif tinggi, seperti lingkungan pasir (benda B1 dan C), cenderung menjadi lokasi katodik, sementara lingkungan dengan konsentrasi oksigen terlarut rendah, seperti lingkungan lempung (A2 dan C), cenderung untuk menjadi anodik.

Korosi, tidak hanya pada baja tetapi juga pada material logam lainnya, merupakan perubahan keadaan yang terjadi secara spontan di alam. Pengontrolan, atau pengecekan kecepatan perubahan merupakan tujuan proteksi karat. Penyelidikan dilakukan dengan cara berbeda tergantung dari bagaimana korosi itu diteliti, apakah dalam perspektif makro ataukah mikro. Dari perspektif mikro, pembentuk area anodik dan katodik dipelajari dengan teori elektrokimia, dan tingkat korosi diperiksa dengan menggunakan arus korosi. Demikian juga, dari perspektif makro, struktur dan bagian struktur merupakan topik studi dan tingkat korosinya diperiksa dengan menggunakan kehilangan korosi dan area korosi. Dalam kasus manapun, tugas

penting dalam teknik sipil adalah melakukan penilaian dengan akurat tingkat kekuatan struktur ataupun tingkat degradasi struktural.

Gbr. 1 Struktur Sel Korosi

Gbr. 2 Uji Model untuk Pembentukan Sel Korosi



(Halaman 19: Sampul belakang)

*Simposium FBBJ*

## **Simposium mengenai Riset Struktur Baja Teknik Sipil**

Simposium ini dilaksanakan tiap tahun sejak tahun 2005 dengan tujuan diseminasi hasil-hasil penelitian dari “Program Subsidi Riset/Pendidikan Struktur Baja” oleh FBBJ. Simposium ke 16 ini difokuskan khususnya pada “Kerusakan akibat Gempa Bumi Besar Jepang Timur dan Upaya Restorasi dan Rekonstruksinya”, kuliah khusus oleh individu-individu terkenal dalam bidang teknik sipil di Jepang dan diketuai oleh Prof. Yozo Fujino dari Sekolah Tinggi dari University of Tokyo

Program kuliah menyampaikan laporan mengenai berbagai bidang teknik sipil yang terkait dengan laporan kerusakan dan langkah-langkah restorasi/rekonstruksi: struktur pelabuhan, struktur jalan rel, tanggul sungai, struktur jalan raya, deposit dan debris tsunami dan likuifaksi tanah. (Untuk detail, lihat program kuliah di bawah ini. Ada beberapa presentasi yang secara partial dimasukkan di dalam terbitan sekarang)

Prof. Emeritus Nobuo Shuto dari Universitas Tohoku, peneliti ternama dalam bidang tsunami di Jepang, menyampaikan kuliah khusus tahunan dengan judul “Bersama Tsunami selama 50 tahun.” Cakupan tema-tema khususnya menunjukkan pengetahuannya yang sangat bernilai yang diperoleh dari 50 tahun meneliti tsunami, dan tipe-tipe kerusakan yang diakibatkan oleh tsunami, perlunya fasilitas pencegah tsunami, dan persiapan untuk bencana alam termasuk kegunaan *software* penanggulangan.