

# STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(No. 39 Agustus 2013)

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-sipilan.

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. 39 Agustus 2013: Isi**

---

Perawatan Fasilitas Pelabuhan	1
Manajemen Siklus Layanan Struktur Baja Pelabuhan	4
Pengaruh Kondisi Cacat dan Paparan terhadap Degradasi akibat Korosi Tiang Pancang dan Pelat Baja dalam Lingkungan Laut	7
Evaluasi Daya dukung Sisa Struktur Baja Terkorosi dan Prediksi Performa di Masa Depan	10
Teknologi Asesmen Performa Siklus Layanan untuk Struktur Baja Pelabuhan dengan Fokus Performa Pasca-Perbaikan	13
Metode Metode Asesmen untuk Kekuatan Sisa Struktur Baja Pelabuhan yang Rusak karena Korosi	16

---

Versi Indonesia: ©Federasi Besi dan Baja Jepang 2013

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>

(Halaman 1~3)

## Perawatan Fasilitas Pelabuhan

oleh Naoki Endo, Kantor Manajemen, Divisi  
Perencanaan Teknik, Biro Pelabuhan, Kementrian  
Pertanahan, Infrastruktur, Transport dan Pariwisata

### Pengantar

Kebanyakan fasilitas pelabuhan Jepang dibangun dan dikembangkan pada tahun 1970an dan 1980an sehingga diperkirakan akan serentak memasuki akhir masa layannya dimasa yang akan datang. Selayaknya infrastruktur sosial lainnya, fasilitas pelabuhan membutuhkan penanganan untuk efek penuaan.

Tetapi, Jepang menghadapi masalah lainnya: keterbatasan fiskal yang dihadapi pemerintah pusat dan lokal, populasi yang menurun, tingkat kelahiran yang menurun dan masyarakat dengan usia lanjut. Dengan kondisi ini, akan sulit untuk menerapkan penanggulangan penuaan infrastruktur sosial nasional secara konvensional. Untuk menghadapi ini, Kementrian Pertanahan, Infrastruktur, Transport dan Pariwisata (MPITP) telah mendirikan Komite Strategis Perawatan Infrastruktur Sosial dan sejumlah komite lainnya yang diberi mandat untuk mempelajari penanggulangan kondisi infrastruktur yang usang. Berikut ini diperkenalkan salah satu cara penanggulangan yang merupakan program perawatan preventif untuk fasilitas pelabuhan.

### Dari Perawatan Akhir ke Perawatan Preventif

Dermaga publik berperan penting sebagai bagian dari fasilitas pelabuhan. Pada akhir bulan Maret 2013 sekitar 8% dermaga publik telah berfungsi selama 50 tahun atau lebih semenjak pembangunannya. Akan tetapi, angka ini diperkirakan akan meningkat hingga 58% setelah 20 tahun lagi pada bulan Maret 2033 (Gbr. 1). Karena semakin banyak fasilitas ini yang mengalami kerusakan akibat proses penuaan (Gbr. 2), maka timbullah kekhawatiran tidak hanya akan kerusakan fungsional tetapi akan kemungkinan terjadinya kecelakaan.

Gbr. 1 Konstruksi Dermaga Publik di Jepang  
Gbr. 2 Contoh Dermaga yang Habis Masa Layannya

Penuaan yang sedang terjadi menimbulkan dua masalah serius: biaya siklus layan yang meningkat (biaya perawatan dan perbaikan) dan daya layan bagi

publik dipertanyakan akibat kecelakaan dan faktor lain yang merugikan terkait usia. Untuk menanggapi situasi ini, kami menganggap penting untuk mengembangkan pendekatan konseptual baru dalam perawatan: contohnya, untuk bergeser dari perawatan di akhir yang tidak melaksanakan penanggulangan yang dibutuhkan sampai diperlukannya pekerjaan perbaharuan yang drastis, menjadi perawatan preventif yang menekankan pentingnya memperpanjang usia layan dan meminimalkan biaya siklus layan (lihat Gbr. 3).

Kami juga menganggap bahwa perawatan menyeluruh perlu dilaksanakan oleh administor pelabuhan dan bahwa mekanismenya harus dipelajari untuk mencegah kecelakaan dan pemburukan akibat habis masa pakai.

Gbr. 3 Gambar Perawatan Preventif dan Perawatan di Akhir

### Langkah Khusus yang Dikembangkan oleh Biro Pelabuhan

Dalam rangka mengembangkan program perawatan sebagai penanggulangan kerusakan akibat habisnya masa layan, Biro Pelabuhan sudah mempersiapkan hukum dan peraturan yang terkait dengan teknologi dan pembiayaan untuk program perawatan dan implementasi perawatan berdasarkan program tersebut.

Sekalipun program perawatan yang diusahakan sesuai untuk perawatan fasilitas pelabuhan masing-masing, masih diperlukan studi yang terkait dengan pengurangan pengeluaran proyek untuk fasilitas pelabuhan atau terkait dengan pemerataan pengeluaran proyek tahunan. Dalam situasi demikian, Biro telah memperkenalkan sebuah "program perawatan preventif" yang menyertakan studi komprehensif dengan basis semua pelabuhan

### Program Perawatan Preventif

Program perawatan preventif menasar berbagai fasilitas di dalam sebuah pelabuhan, dan menentukan penanggulangan penuaan fasilitas dan program ini juga menawarkan sebuah perencanaan proyek lima-tahunan berdasarkan langkah penanggulangan yang ditentukan. Program ini pada dasarnya dikembangkan berbasis tiap pelabuhan. Entitas utama yang dilibatkan dalam persiapan program ini adalah pemerintah pusat (organisasi pemerintah yang bertanggung jawab akan administrasi langsung pelabuhan) dan administrator pelabuhan. Program ini juga dibuat dengan beberapa

kesepakatan yang disetujui oleh kedua entitas. Kebijakan dalam program ini dituangkan dalam "petunjuk aksi" untuk menentukan apakah perlu diterapkan langkah-langkah tertentu melawan penuaan (lihat Table 1).

Tabel 1 Program Perawatan Preventif (Konsep)

Penentuan-penentuan yang diambil dengan menggunakan "petunjuk aksi" didasari pada overview yang komprehensif yang mempertimbangkan kondisi sosial sekeliling fasilitas target (kondisi aplikasi saat ini, pengujian rencana konversi aplikasi atau tidak adanya pengujian rencana konversi alternatif, asumsi penggunaan darurat atau tidak adanya asumsi, permintaan pengguna pelabuhan) dan kondisi fisik (tingkat penuaan, karakteristik struktural).

Dalam keputusan yang dicantumkan dalam "petunjuk aksi" dinyatakan perlu untuk memeriksa tidak hanya fasilitas yang diimplementasikan secara aktif sebagai penanggulangan penuaan tetapi juga fasilitas yang harus dikonversi untuk tujuan lainnya ataupun untuk menentukan langkah penanganan apa yang tidak perlu dilanjutkan. Sebagai contoh, perawatan pencegahan tidak dilakukan pada fasilitas yang berdiri di lokasi yang direncanakan untuk reklamasi atau untuk fasilitas yang akan dikonversi untuk penggunaan lain karena tidak lagi berfungsi sebagai fasilitas sandar. Dengan cara ini, perlu memberikan perhatian yang sesuai dalam merencanakan perawatan pencegahan sedemikian agar dapat dikembangkan program yang rasional yang mempertimbangkan pengurangan biaya siklus layan semua fasilitas pelabuhan. Di samping itu, perencanaan ini harus dapat mempertahankan fasilitas pelabuhan sebagai stok dan menjamin semua fungsi pelabuhan serta memiliki isi strategis dan terencana.

### **Kesimpulan**

Program perawatan preventif akan dimulai tahun 2013. Agar dapat menyiapkan program ini dengan baik, kami bermaksud memeriksa ulang program yang ada dengan mempertimbangkan perubahan tren social dan berbagai tugas dalam implementasi proyek perawatan preventif. Kami dari Biro Pelabuhan berusaha keras untuk menciptakan langkah-langkah penanggulangan yang efektif terhadap penuaan fasilitas pelabuhan. Usaha ini meliputi: implementasi program perawatan preventif yang ada yang mempertimbangkan kerja dewan pemeriksa yang kemudian mempertimbangkan

program dan langkah-langkah perawatan berdasarkan sistem baru yang sah; dan bekerja sama dengan administrator pelabuhan dan entitas lainnya. Tujuan kami adalah untuk mempertahankan layanan publik berkualitas.

■ ■ ■ ■ ■

(Halaman 4~6)

## **Manajemen Siklus Layan Struktur Baja Pelabuhan**

*oleh Hiroshi Yokota, Profesor, Laboratorium Rekayasa Seumur Hidup, Universitas Hokkaido*

### **Pengantar**

Struktur pelabuhan memiliki masa layan yang panjang dan diharapkan memenuhi kebutuhan selama masa layannya yang tidak diramalkan sebelumnya. Baja dan beton sebagai material struktur utama cenderung rusak akibat unsur kimia dan fisik dalam lingkungan pantai yang keras dan akibatnya dapat mengakibatkan penurunan performa struktural dan bahkan keruntuhan structural. Pada tahap disain awal, disainer membuat beberapa asumsi, seperti kondisi terburuk dan margin aman tertentu, sehingga struktur yang didisain akan memiliki performa struktural dengan tingkat yang diharapkan. Akan tetapi, pemburukan serius batang struktur dapat diakibatkan disain dengan daya tahan yang tidak memadai dengan menggunakan asumsi-asumsi yang optimistik dan/atau kurangnya perawatan yang sesuai.

Dengan kenyataan ini, disain dan perawatan harus terkoodinasi dengan baik. Manajemen siklus layan merupakan sistem terencana untuk mendukung pengambilan keputusan dengan basis rekayasa untuk menjamin performa struktural yang memadai dan masa layan struktur yang panjang pada saat disain, perawatan dan semua pekerjaan yang terkait dengan masa layan struktur.

### **Manajemen Siklus Layan**

Masa layan struktur ditentukan oleh segala aktivitas yang dituangkan ke dalam perencanaan, disain dasar dan disain detil, dan eksekusinya termasuk pemilihan material, produksi dan konstruksi, perawatan termasuk asesmen dan intervensi, dan pe non-aktifan, seperti dalam Gbr. 1. Manajemen siklus layan merupakan

konsep terpadu untuk membantu pekerjaan mengatur siklus layan struktur yang berkelanjutan. Keberlanjutan (*sustainability*) merupakan salah satu kata kunci untuk struktur pelabuhan dan infrastruktur sipil lainnya.

Dalam manajemen masa layan, seperti pada Gbr. 2, pekerjaan yang paling utama adalah memformulasikan dan meng-*update* skenario manajemen siklus layan (LCM *scenario*). Skenario ini harus diformulasikan dengan mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

- Karakteristik Lingkungan;
- Asumsi dalam disain;
- Hasil verifikasi;
- Spesifikasi;
- Estimasi biaya awal;
- Skenario perawatan dan metodologi manajemen siklus layan
- Persyaratan performa;
- Estimasi masa layan
- Biaya siklus layan;
- Biaya lingkungan; dan
- Keusangan; penghancuran dan penggunaan kembali.

Gbr. 1` Siklus Layan Struktur

Gbr. 2 Sistem Manajemen Siklus Layan

Selama tahap awal disain, disain masa layan akan diaplikasikan untuk memperkirakan ketahanan dan degradasi performa. Sebagaimana digambarkan secara sistematis dalam Gbr. 3(a) dengan berbagai alternatif yang muncul, konsep fundamental bagaimana seharusnya performa struktur haruslah dengan pertimbangan persyaratan, masa layan disain, karakteristik struktural, properti material, kesulitan dalam asesmen dan intervensi, kepentingan sosial dan ekonomis, dll. Untuk struktur baja pelabuhan, korosi baja merupakan penyebab utama degradasi performa yang harus dipertimbangkan pada disain awal. Oleh karenanya korosi baja dan memburuknya sistem proteksinya harus sepenuhnya dipertimbangkan. Umumnya, kita tidak perlu khawatir akan fatik pada baja untuk struktur pelabuhan.

Perawatan merupakan strategi penting untuk menanggulangi degradasi dan dilakukan untuk menilai kondisi struktur dan untuk mengkuantifikasi tingkat performa struktur.

Di samping itu, metode intervens yang paling sesuai dipilih untuk meminimalkan biaya siklus layan ataupun memaksimalkan pengembalian performa struktural dengan anggaran ketat dengan cara memprediksi

kecepatan degradasi performa struktural, seperti dalam Gb. 3(b). Selama tahap perawatan, para insinyur awalnya mengikuti skenario dengan asumsinya pada tahap disain. Untuk melaksanakan perawatan yang strategis, sebuah strategi perawatan haruslah diformulasikan sebagai skenario LCM. Disain masa layan atau disain durabilitas sudah dilaksanakan berdasarkan berbagai asumsi pada disain awal. Oleh karenanya output disain harus diverifikasi dengan kerja perawatan karena kecepatan memburuknya, termasuk korosi, tidak akan mengikuti asumsi disain. Hal ini terkait dengan *update* skenario LCM. Skenario ini harus di-*update* dengan menampilkan situasi aktual dan perubahan kondisi struktur.

Gbr. 3 Skenario LCM

### Skenario LCM

Disini akan disampaikan satu contoh formulasi skenario LCM. Sebuah dermaga tepi tiang terbuka seperti pada Gbr. 4 dijadikan studi kasus. Struktur bawah dermaga terbuat dari tiang pancang baja, dengan diameter dan ketebalan masing-masing 1500 mm dan 19 mm dari bagian di atas DL-18 m dan 1500 mm dan 15 mm dibawahnya. Berdasarkan tingkat korosi baja, digunakan profile tingkat korosi pada Gbr. 5 yang telah diukur pada dermaga terdekat selama 26 tahun. Kecepatan korosi biasanya berbeda mengikuti lokasi. Oleh karenanya, untuk membuat pendekatan probabilistik maka nilai-nilai maksimum, rata-rata, dan nilai minimum harus diperhitungkan

Untuk menangani resiko korosi, dirumuskan empat skenario LCM:

- S1: Tidak ada pencegahan korosi
- S2: Pelapisan (DL+2.5~-1.0 m)
- S3: S2+S4
- S4: Proteksi Katodik (DL-1.0~-12 m)

Masa disain pelapisan dan proteksi katodik ditentukan 50 tahun. Kenyataannya, banyak skenario dapat dipertimbangkan tergantung masa disain sistem proteksi korosi. Efisiensi proteksi korosi proteksi katodik ditentukan 90%.

Performa struktur diverifikasi dengan menggunakan analisa *push-over* dan analisis respon dinamik untuk level-1 dan level-2 ground motion. Probabilitas keruntuhan dermaga ditingkatkan karena adanya korosi tiang pancang baja. Gbr. 6 menunjukkan probabilitas kerusakan menurut waktu terhadap (a) gerakan bumi level-1 dan (b) gerakan bumi level-2. Nilai probabilitas yang diijinkan masing-masing ditetapkan 0,0038 dan

0,01 untuk level-1 dan level-2. Oleh karenanya, sebelum mencapai nilai tersebut, dibutuhkan kekuatan untuk mengembalikan performanya. Dengan scenario itu, S1 membutuhkan kekuatan 3 kali (tahun ke 16 dan ke 30 untuk level-1 dan tahun ke 44 untuk level-2) selama masa layan disain 50 tahun. S2 membutuhkan kekuatan 2 kali pada tahun ke 36 untuk level-1 dan pada tahun ke 45 untuk level-2. S4 tidak membutuhkan kekuatan tetapi membutuhkan 2 kali hanya untuk gerakan bumi level-1 pada tahun ke 16 dan ke 33. Untuk perhitungan ini, pengelasan pelat baja diadopsi untuk kekuatan. Dengan teknik kekuatan, daya dukung dapat sepenuhnya kembali, tetapi daktilitas dapat berkurang hingga sekitar 40% nilai awal akibat pengelasan basah bawah air.

Disainer harus memilih skenario terbaik diantara berbagai alternatif. Dalam pemilihannya, indikator yang paling tepat harus ditentukan untuk penilaian objektif. Biaya siklus layan adalah salah satu indikator yang akan dibicarakan selanjutnya.

Gbr. 4 Dermaga Tiang Terbuka untuk Studi Kasus

Gbr.5 Variasi Tingkat Korosi

Gbr. 6 Peningkatan Probabilitas Kerusakan akibat Korosi Tiang Pancang Baja

### **Asesmen dan Evaluasi**

Karena degaradasi performa struktur baja pelabuhan terutama diakibatkan korosi baja, kecepatan korosi harus dimonitor selama masa layan. Kecepatan korosi berbeda-beda mengikuti lokasi karena ketidak-homogenan karakteristik material dan keberagaman kondisi lingkungan. Skenario LCM harus *diupdate* dengan menggunakan data korosi riil.

Deteksi pemburukan terkait usia sangat penting untuk memahami kondisi struktur. Kerusakan pelapisan dan sistim proteksi korosi lainnya pada awalnya terlihat sebagai kerusakan pada permukaan. Tingkat inspeksi dan investigasi mempengaruhi metoda asesmen performa struktur. Asesmen dapat dilakukan dengan konsep –menurut kondisi dan konsep–menurut performa. Konsep dengan dasar performa harus diaplikasikan untuk asesmen performa, dan biasanya membutuhkan biaya, teknik mutakhir, dll. Oleh karenanya, asesmen berdasarkan kondisi kurang dapat diterima karena kelayakannya. Sistim penilaian sudah sering digunakan, dimana kondisi pemburukan dievaluasi dan dinilai sesuai dengan tingkat kerusakan.

Inspeksi visual sudah sering diaplikasikan untuk menilai kondisi struktur dan membuat pertimbangan

apakah kedepannya diperlukan investigasi detil. Untuk penilaian yang tepat, inspeksi harus dilakukan dengan interval regular. Apabila pemburukan terkait dengan performa struktural, maka performa struktural dapat langsung dinilai. Inspeksi visual dapat menunjukkan perubahan tampilan elemen struktur, namun performa struktural harus dievaluasi setepat mungkin. Apabila hubungan antara performa struktural (kapasitas struktural) dan nilai pemburukan dapat ditemukan dengan eror yang masih dapat diterima, maka intervensi dapat direncanakan dengan menggunakan tingkat/nilai pemburukan.

Bila inspeksi visual tidak cukup untuk memberikan data yang tepat untuk asesmen, direkomendasikan untuk melakukan inspeksi detil. Inspeksi atau investigasi detil meliputi kuantifikasi tingkat pemburukan dengan teknik non-destruktif ataupun destruktif, dll. Asesment langsung dapat dilakukan apabila tersedia data yang cukup untuk dilakukannya analisa numerik. Seperti disebut sebelumnya, pemburukan dapat berbentuk berbagai macam; sehingga perlu mengkuantifikasi variasi yang ada.

### **Update Skenario**

Beberapa aturan teoritis, model simulasi, formula verifikasi, dll, digunakan untuk memprediksi kecepatan pemburukan. Akan tetapi, tren yang diamati selama perawatan, seperti contohnya tingkat korosi, dapat digunakan untuk menduga kecepatan pemburukan dimasa depan. Berdasarkan data dan hasil asesmen, aturan dan proses pemburukan dan/atau degradasi performa harus dimodifikasi dan skenario yang digunakan harus *diupdate*.

### **Biaya Masa Layan**

Apabila keruntuhan komponen struktur dapat menimbulkan bencana, maka semua keruntuhan yang mungkin harus dikategorikan berdasarkan konsekuensinya. Untuk mengurangi resiko keruntuhan yang terjadi selama masa layan dengan konsekuensi kritis, maka masa layan komponen struktur tertentu haruslah dibuat lebih panjang sehingga terpenuhi persyaratan yang dituntut dalam inspeksi dan perawatan. Untuk menentukan skenario LCM termasuk penentuan waktu dan metode intervensi yang tepat, indikator yang terbaik adalah perkiraan biaya siklus layan. Biaya siklus layan dihitung berdasarkan berbagai asumsi, namun menghasilkan informasi yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan mengenai arah perawatan di masa depan. Dalam perhitungannya

biaya yang ditotal adalah biaya awal, biaya perawatan termasuk biaya inspeksi dan biaya intervensi yang direncanakan.

Dengan melakukan estimasi biaya siklus layan, dapat dilakukan berbagai asesmen biaya selama periode tertentu. Dengan melakukan perbandingan biaya beberapa skenario alternatif LCM dapat dipilih strategi yang paling ekonomis.

Perhitungan biaya siklus layan ke empat skenario LCM digambarkan dalam Gbr. 7. Karena kekuatan membutuhkan biaya, tepat sebelum tercapai nilai maksimum probabilitas kegagalan, biaya terkait diperbesar. Gambar menunjukkan bahwa strategi perawatan preventif adalah yang paling sedikit biaya, sekitar sepertiga biaya skenario yang paling mahal. Selama 50 tahun, skenario yang paling ekonomis adalah S3 diikuti oleh skenario S4, S2 dan S1. Hal ini berarti bahwa efisiensi pencegahan korosi (langkah preventif) harus menjadi skenario terbaik dalam hal biaya. Akan tetapi, apabila masa layan diperkirakan kurang dari 50 tahun, maka solusi terbaik dapat berbeda tergantung dari masa layan.

Gbr. 7 Perhitungan Biaya Siklus Layan

## Penutup

Sistim manajemen masa layan termasuk evaluasi performa struktural dan prediksi kecepatan kerusakan akan menjadi alat terbaik untuk membangun dan merawat struktur. Penulis juga berharap agar dilakukan perawatan efektif dan rasional sehingga dapat dicapai pengurangan biaya masa layan dan performa yang maksimal. Hal ini akan menentukan keberlangsungan struktur pelabuhan. Untuk pengembangan sistim selanjutnya, dibutuhkan riset mengenai verifikasi akurat atas performa struktural dari bangunan yang ada termasuk metodologi inspeksi dan investigasi dan prediksi yang tepat akan kecepatan perusakan dan degradasi performa.

■ ■ ■ ■ ■

(Halaman 7~9)

## Pengaruh Cacat dan Kondisi Paparan terhadap Degradasi Pelapisan Tiang Pancang dan Pelat Baja dalam Lingkungan Laut

*oleh Nobuaki Otsuki, Profesor, dan Takahiro Nishida, Assistant Professor, Institut Teknologi Tokyo Tokyo*

### Korosi Struktur Baja Lepas Pantai di Lingkungan Laut

Karena struktur baja lepas pantai terpapar lingkungan korosi berat, penting untuk mengerti bagaimana kecepatan kerusakan struktural terjadi akibat korosi pada baja yang dicat dan untuk mencari metoda untuk meramalkan penurunan performa struktural. Sementara itu, untuk menilai kecepatan kerusakan jangka-panjang dalam waktu yang relatif singkat, diusulkan untuk melakukan uji akselerasi.

Akan tetapi, pengaruh paparan dan kondisi akselerasi terhadap cepatnya penurunan kualitas belumlah jelas. Demikian juga belum jelas mengenai "perbesaran akselerasi," yaitu korelasi antara periode uji akselerasi dengan periode paparan dalam lingkungan korosif aktual. Banyak contoh dalam berbagai riset yang ada yang mencatat korosi seragam (korosi sel mikro) yang terjadi pada bahan baja, tetapi hanya sedikit riset yang memeriksa kecepatan kerusakan korosi setempat (korosi sel makro)

Kami sudah memeriksa isu-isu tersebut dengan perspektif degradasi lapisan, dan hasilnya dipaparkan di bawah ini.

### Korosi Produk Baja dalam Lingkungan Laut

Banyak contoh studi mengenai korosi pada produk baja tanpa cat di lingkungan laut. Sebagai contoh, hasil studi pada Gbr. 1 (a) menunjukkan bahwa tingkat korosi meningkat di daerah HWL atas (zona percik) dan di zona di bawah LWL. Dalam hal ini, korosi produk baja tanpa cat di lingkungan laut bertambah akibat korosi sel makro, yang biasanya terjadi dalam (1) daerah anodik dimana tingkat korosi meningkat dan (2) daerah katodik dimana tingkat korosi menurun. Untuk mencegah terjadinya korosi, umumnya diterapkan langkah-langkah proteksi korosi seperti pelapisan cat pada struktur baja lepas pantai.

Beberapa mekanisme proteksi korosi yang biasa yang terjadi pada pelapisan cat adalah: menghilangkan bahan korosif seperti  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  dan menekan pembentukan lokasi reaksi korosi. Secara konvensional, diduga bahwa apabila diberikan pelapisan yang baik, maka lapisan akan sulit rusak, dan ketika terjadi cacat akibat benturan struktur baja lepas pantai dengan kapal atau struktur lain, korosi (terutama korosi sel mikro) akan terjadi di daerah cacat. Akan tetapi, dipastikan melalui uji paparan yang dilakukan di lingkungan

sebenarnya (Teluk Suruga, paparan 20-tahun). ditunjukkan pada Gbr. 1(b), bahwa pengelupasan, robek dan jenis degradasi lainnya dapat terjadi dalam lingkungan sebenarnya dan bahwa area korosi juga meluas.

Kami menilai bahwa penyebab gejala korosi tersebut adalah korosi sel makro, dan kami melakukan studi dengan menggunakan spesimen uji khusus yang memungkinkan pengukuran arus korosi sel makro dengan menggunakan produk baja terbagi, seperti yang digambarkan dalam bab berikut.

Gbr. 1 Distribusi Korosi pada Pelat Baja dalam Lingkungan Laut

### **Pengaruh Korosi Produk Baja pada Degradasi Pelapisan dan Mekanisme Pertumbuhannya**

Gbr. 2 menunjukkan gambar konsep korosi sel mikro dan sel makro.

Seperti terlihat pada gambar, dalam korosi sel mikro, baik reaksi anodik maupun katodik terjadi secara seragam: reaksi anodik dimana terjadi pelarutan besi dan reaksi katodik dimana oksigen and air membentuk ion hidroksida. Untuk menilai korosi sel mikro dalam kasus demikian, metode yang umum digunakan tergantung pada *polarization resistance* yang diperoleh dengan menggunakan impedansi AC dan metode lainnya. Dalam hal ini, metode yang biasa digunakan adalah yang diusulkan oleh M.Stern dan A.L Geary untuk mengkonversi dari *polarization resistance* menjadi densitas arus sel mikro

Dalam korosi sel makro, reaksi anodik yang terjadi secara setempat menyebabkan korosi. Untuk menilai korosi sel makro tersebut perlu diukur arus yang mengalir dari katoda ke anoda. Akan tetapi, sulit untuk secara langsung mengukur arus yang mengalir pada produk baja. Untuk mengatasinya, kami menyiapkan spesimen uji terpisah seperti pada Gbr. 3, dan mengusulkan suatu metoda untuk menilai arus yang mengalir dari katoda ke anoda, yang digunakan untuk menilai korosi sel makro.

Gbr. 4 menunjukkan perubahan pada densitas arus sel makro terhadap waktu spesimen (a) dan pada densitas arus sel mikro spesimen (b), dimana keduanya dicat dengan pelapis jenis asam phtalis (ketebalan: 150  $\mu\text{m}$ ) dan pada keduanya terdapat cacat. Jelas dari gambar itu bahwa densitas arus sel makro pada bagian cacat terjadi pada paparan tahap awal, densitas arus negatif (densitas arus katoda) pada bagian yang dilapisi terus bertambah; dan dengan bertambahnya periode

paparan densitas arus sel makro pada bagian cacat terus meningkat. Selanjutnya, ketika pH di dalam lepuhan diukur, terlihat bahwa timbul lingkungan alkalin tinggi dengan pH 10~13, yang berarti ada kemungkinan OH dihasilkan dan terakumulasi di bawah bagian yang dicat akibat reaksi katodik. Dengan hasil ini, diyakini bahwa lepuhan, robekan dan bentuk lain degradasi lapisan sangat dipengaruhi oleh reaksi katodik korosi sel makro.

Pemeriksaan perilaku ini menunjukkan bahwa memburuknya produk baja lapis cat bertambah seperti dalam Tabel 1. Khususnya, karena periode dimana terjadi pelepuhan sangat terkait dengan ekspansi daerah korosi, maka sangat penting untuk memastikan kapan periode terjadinya pelepuhan. Kemudian, kami mencoba menghitung akselerasi perbesaran dari uji akselerasi menjadi lingkungan paparan aktual dengan membandingkan hasil uji akselerasi dengan hasil uji paparan aktual

Gbr. 2. Garis Besar Korosi Sel Mikro dan Sel Makro

Gbr. 3 Garis Besar Spesimen Pelat Baja Terpisah

Gbr. 4 Perubahan terhadap Waktu Korosi Sel Makro dan Sel Mikro Spesimen Baja Lapis Cat dengan Cacat  
Tabel 1 Perkembangan Korosi sekitar Cacat Baja Lapis Cat

### **Verifikasi Validitas Konversi Hasil Uji Akselerasi ke Periode Paparan Aktual**

Tabel 2 meringkas periode hingga terjadinya pelepuhan dalam uji akselerasi yang dilakukan pada produk baja lapis cat dengan cacat (50<sup>0</sup>C, pada benaman dengan garam) dan pada elemen yang terpapar lingkungan aktual. Seperti ditunjukkan dalam tabel, nilai yang diramalkan dengan hasil uji akselerasi konsisten dengan nilai yang diperoleh dari hasil uji paparan aktual. Oleh karenanya, pendekatan yang kami usulkan di atas dapat dikatakan valid untuk mengkonversi dari hasil uji akselerasi ke hasil uji paparan aktual.

Tabel 2 Perbesaran Tiap Faktor dan Faktor Total dan Perbandingan antara Nilai Durasi Perkiraan dengan Nilai Aktual Periode Inkubasi Baja Lapis Cat dengan Cacat

### **Promosi Riset tentang Proteksi Korosi Struktur Baja Lepas-Pantai**

Dalam teks ini kami telah menyampaikan hasil pemeriksaan terkini korosi produk baja dalam

lingkungan laut, khususnya pengaruh cacat produk baja dan kondisi paparan terhadap degradasi lapisan. Tetapi, karena banyak faktor lainnya dalam masalah korosi yang belum jelas, promosi riset tentang korosi struktur baja yang terpapar pada lingkungan aktual merupakan isu yang mendesak bagi para insinyur. Kami akan senang bila hasil studi kami dan proposal yang kami sampaikan ternyata berguna dalam mengarahkan sistem perawatan di masa depan dan perpanjangan masa layanan infrastruktur sosial.

■ ■ ■ ■ ■

(Halaman 10~12)

## **Evaluasi Daya dukung Sisa Struktur Baja Korosi dan Prediksi Performa Masa Depan**

*oleh Katashi Fujii, Profesor, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Sekolah Tinggi Teknik, Universitas Hiroshima*

Karena struktur pantai dan lepas pantai terpapar pada lingkungan korosif yang berat, penurunan mutu akibat berkurangnya ketebalan karena proses korosi menimbulkan masalah keamanan struktur. Berikut ini dibahas bagaimana mempertahankan keamanan struktur baja terkorosi dalam lingkungan laut melalui riset kami tentang evaluasi daya dukung tiang baja pipa dan prediksi performanya di masa depan.

### **Investigasi Kondisi Korosi**

Untuk mengevaluasi dengan tepat atau memprediksi sisa daya dukung sebuah struktur, perlu diketahui kondisi korosi saat ini seperti tebal dinding dan koordinat tiga-dimensinya pada permukaan tidak rata akibat korosi. Dalam menilai kuat sisa sebuah elemen, nilai statistik ketebalan pelat terkorosi seperti ketebalan rata-rata dan deviasi standar, digunakan sebagai indeks representatif, dan karena pengukuran kondisi korosi semakin rinci dan tepat, nilai-nilai statistik yang diperoleh menjadi lebih akurat. Sebagai contoh, sekalipun koordinat permukaan dinding yang tidak rata dapat diukur hingga rinci dengan presisi tinggi dengan menggunakan pengukuran laser tiga-dimensi (Foto 1), praktek yang sering digunakan untuk mengukur ketebalan dinding adalah dengan mengadopsi alat ukur

ketebalan ultrasonik. Akan tetapi, alat ukur ini sulit digunakan untuk pengukuran multi-titik.

Dalam hal evaluasi ketebalan rata-rata pada sebuah potongan pipa baja, dimana pengukuran masing-masing dilakukan untuk sejumlah 20 titik (4 lokasi x 5 titik; lihat Gbr. 1) per seksi dan dimana ketebalan rata-rata  $t_r$  diperoleh dengan menggunakan  $t_r = t_{avg} - S$ , evaluasi yang paling aman selalu dapat dilakukan. Dalam hal ini,  $t_{avg}$  dan  $S$  adalah nilai rata-rata dan deviasi standar pada masing-masing ke 20 titik tebal dinding.

Foto 1 Koordinat permukaan diperoleh menggunakan instrumen laser tiga-dimensi  
Gbr. 1 Titik Pengukuran Tebal Dinding pada Potongan Tiang Pancang Baja Pipa

### **Evaluasi Daya dukung Sisa**

Dapat dikatakan bahwa metode elemen hingga merupakan alat yang paling efektif dan dapat diandalkan untuk mengevaluasi kuat sisa struktur atau elemen baja terkorosi. Gbr. 2 dan 3 membandingkan hasil analitis dengan hasil percobaan mengenai kuat tekan aksial sisa dari 6 tiang pancang baja pipa yang terpapar kondisi laut selama 19 tahun. Hasil analisis diperoleh dengan menggunakan analisis elemen hingga deformasi besar elasto-plastis. Dalam analisa ini, digunakan data yang diperoleh dengan mengukur tiap interval 1-mm sebagai koordinat permukaan korosi. Dapat dilihat dari gambar bahwa baik kuat sisa maupun mode keruntuhan dapat dievaluasi secara presisi dalam kasus dimana analisisnya dibuat dengan menggunakan pengukuran permukaan terkorosi.

Gbr. 2 Perbandingan Kuat Tekan Aksial Tiang Pancang Pipa Terkorosi antara Hasil Analisa Elemen Hingga dan Hasil Eksperimental

Gbr. 3 Kondisi Kolaps Tekuk Tiang Pancang Pipa Baja Terkorosi (Zona Percik)

Selanjutnya, kuat tekan aksial sisa dapat dievaluasi dengan menggunakan kurva kuat tekuk dalam kondisi tanpa korosi. Dalam hal ini, kuat sisa dapat diperoleh dengan mensubstitusi indeks statistik (ketebalan representatif) ke kurva kekuatan tekuk dalam hal terdapat korosi, dimana ketebalan representative dinyatakan dengan ketebalan rata-rata dan deviasi standar yang diperoleh dari ketebalan yang diukur. Gbr. 5 menunjukkan kuat tekan aksial sisa dari tiang pancang pipa terkorosi, yang diperoleh dengan metode

diatas, dimana ketebalan representatif yang akan dievaluasi ditetapkan (nilai rata-rata --  $0,8 \times$  deviasi standar tebal dinding yang diukur) dan disubstitusikan ke parameter rasio lebar/tebal  $R_t$ , kemudian tegangan tekan aksial  $\sigma_u$  dapat diperoleh dari kurva kuat tekuk non-korosi.

Akan tetapi, harus diperhatikan: Analisis elemen hingga memungkinkan evaluasi kekuatan sisa dengan memperhitungkan moda tekuk dalam tiap keruntuhan, tetapi ketika menggunakan persamaan evaluasi sederhana, kekuatan tekuk hanya untuk mode tekuk tertentu yang dapat dievaluasi. Yaitu, dalam Gbr. 4, hanya kekuatan tekuk setempat dari tiang pancang baja pipa saja yang diberikan, dan kuat tekuk keseluruhan tidak dapat dievaluasi.

Gbr. 4 Prediksi Sederhana Kuat Tekan Aksial dengan Menggunakan Kurva Tekuk tanpa Korosi

### **Prediksi Daya dukung Sisa**

Untuk biaya siklus layan minimum untuk struktur baja, perlu diprediksi perubahan sekular (penuaan) dalam daya dukung sisa dan dirancang perencanaan perawatan masa depan. Bila model sederhana dapat digunakan untuk menyatakan perubahan sekular pada ketidak-rataan bentuk permukaan pelat baja yang diakibatkan oleh penurunan fungsi proteksi korosi dan korosi lanjutannya, maka penurunan kekuatan di masa depan dapatlah diprediksi

Dalam model pembentukan permukaan korosi (Gbr. 5), permukaan pelat baja dibagi menjadi sebuah grid, dan permukaan terkorosi dinyatakan dengan tebal korosi pada tiap persilangan di grid. Dalam model ini, diasumsikan empat faktor: 1) dua macam faktor, faktor pemburukan (*deterioration factor*) dan faktor korosi yang mempunyai kekuatan tertentu dan wilayah yang terkena, yang ada di permukaan; 2) faktor pemburukan menurunkan fungsi proteksi korosi; 3) ketika fungsi proteksi korosi menjadi lebih rendah dari ambang prevensi korosi, korosi mulai terjadi pada permukaan baja; dan 4) akibatnya, permukaan dihabisi oleh faktor korosi, seperti pada Gbr. 6. Parameter untuk faktor pemburukan dan faktor korosi (kekuatan, radius pengaruh, jumlah kerusakan tahunan) dapat ditentukan dari pengukuran kondisi korosi aktual. Dengan menggunakan model ini sekarang dimungkinkan untuk memprediksi permukaan korosi, dan ketika kekuatan struktur dapat dievaluasi dengan cara analisis elemen hingga dengan pertimbangan bentuk permukaan korosi yang diprediksi, dapat diprediksi daya dukung sisa di

masa depan. Sementara itu dalam hal dilakukan pengecatan ulang, nilai fungsi proteksi korosi perlu diperbaharui.

Foto 3 menunjukkan kondisi permukaan dimana telah lewat bertahun-tahun semenjak dilakukan pelapisan tahap awal dan logam dasarnya terpapar, dan Foto 4 menunjukkan garis kontur yang menggambarkan tebal dinding sisa dengan simulasi. Gbr. 6 menunjukkan hasil analisis kuat tekan aksial pada tiang pancang baja pipa dengan menggunakan hasil prediksi permukaan korosi. Sebagaimana digambarkan pada Gbr. 9, kini dimungkinkan untuk mendapatkan prediksi daya dukung sisa struktur baja dengan hasil yang meyakinkan dengan mengadopsi pendekatan yang digambarkan di atas.

Pada tahap disain awal, keandalan prediksi ini mungkin rendah karena prediksi kecepatan korosi hanya didasarkan pada asumsi parameternya. Akan tetapi, dalam hal parameter model direvisi mengikuti kondisi korosi aktual yang diukur pada tiap tahap inspeksi berkala, kekuatan struktur dapat diprediksi dengan lebih akurat dan andal. Kami menganggap bahwa, dalam hal rencana perawatan dibuat berdasarkan pendekatan prediktif yang digambarkan di atas, pada akhirnya akan dimungkinkan untuk mengurangi biaya siklus layan struktur baja hingga minimum.

Gbr. 5 Pemodelan Bentuk Tebal Korosi

Foto 2 Contoh analisis kondisi pemburukan lapisan (Area gelap: Logam dasar terpapar)

Foto 3 Periode pelapisan ulang dan hasil simulasi untuk tebal dinding residual setelah 100 tahun (zona benam)

Gbr. 6 Prediksi Hasil untuk Pengurangan Kekuatan yang Dipengaruhi Periode Pelapisan Ulang (Zona benam)

### **Ucapan Terima Kasih**

Riset ini dilakukan dengan subsidi riset dari Federasi Besi dan Baja Jepang dan sebagai link dalam kegiatan Komite Kerja untuk Evaluasi Proteksi Korosi dan Durabilitas Struktur Baja dan Struktur Komposit dalam Lingkungan Lepas Pantai (diketuai oleh E. Watanabe), Komite Struktur Baja Masyarakat Insinyur Sipil Jepang. Kami mengucapkan terima kasih kepada anggota komite dan organisasi-organisasi terkait untuk dukungan dan kerja-samanya yang baik.

■ ■ ■ ■ ■

(Halaman 13~15)

## **Teknologi Asesmen Performa Siklus Layan untuk Struktur Pelabuhan dengan Fokus pada Performa Pasca-Perbaikan**

oleh Yoshito Itoh, Profesor, Yasuo Kitane, Associate Professor, dan Mikihiro Hirohata, Assistant Professor, Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknik, Universitas Nagoya

### **Perpanjangan Masa Layan Struktur Pelabuhan yang Menua**

Untuk memperpanjang masa layan struktur pelabuhan yang menua dengan cara rasionalisasi perawatan, penting untuk mengukur dengan pasti performa sebelum dan sesudah perbaikan agar diketahui performa siklus layan selama masa layan rencana, dan untuk menentukan inspeksi dan perawatan yang dibutuhkan. Kami telah mempelajari daya dukung pasca-perbaikan dan durabilitas tiang pancang yang diperbaiki dengan pengelasan pelat baja dengan target pancang baja pipa dengan performa menurun akibat korosi. Di bawah ini disampaikan garis besar dari studi kami.

### **Daya dukung Tiang Pancang Pipa Baja setelah Perbaikan dengan Las Pelat Baja**

Gbr. 1 menunjukkan metode perbaikan dengan pengelasan pelat baja--metode yang biasa digunakan untuk perbaikan dan perkuatan pipa dan turap baja terkorosi. Dalam metode ini, bagian yang rusak akibat korosi ditutup dengan tambalan pelat baja, yang kemudian dilas ke potongan baja eksisting dengan *fillet welding*. Bila bagian terkorosi berada di air laut digunakan pengelasan basah bawah air. Lingkungan pengelasan, kering atau basah, dapat mempengaruhi properti karakteristik las. Banyak dilaporkan bahwa cacat las dapat terjadi selama pengelasan bawah air dan bahwa bila dibandingkan dengan pengelasan di udara terbuka, pengerasan las bawah air meningkatkan sementara daktilitas las menurun. Hasil serupa diperoleh dari uji kekuatan *fillet welding* yang menggunakan pipa baja dan turap baja sebagai logam dasar. Seperti ditunjukkan pada Gbr. 2, sambungan *fillet welding* bawah air memiliki kekuatan statis lebih besar tetapi daktilitas lebih rendah dibandingkan dengan las

di udara terbuka, dan diperoleh bahwa efek tersebut lebih terlihat signifikan pada baja turap dibandingkan pada baja tiang pancang.

Gbr. 1 Tiang Pancang Pipa Baja yang Diperbaiki  
Gbr. 2 Perubahan Relatif pada Kekuatan dan Daktilitas dari Las Udara Terbuka ke Las Bawah Air

Selanjutnya, dilakukan uji dimana perbaikan las pelat baja dengan metode disain yang ada diaplikasikan pada pipa baja yang tebal dindingnya dikurangi dan kemudian performa struktural pipa pasca-perbaikan diperiksa dengan memberikan pembebanan tekan atau beban tekuk. Uji ini jelas menunjukkan bahwa, sekalipun kekakuan dan daya dukung dari pipa yang diperbaiki terhadap tekan atau beban tekuk dapat dikembalikan hingga tingkat yang sama seperti sebelum terjadi kerusakan korosi, daktilitas terkait menurun dibandingkan dengan tingkat sebelum korosi. Gbr. 3 menunjukkan kurva beban-penurunan yang diperoleh dari uji pembebanan tekuk.

Seperti dibahas di atas, kekuatan statis pipa baja setelah perbaikan dapat dikembalikan hingga tingkat sebelum korosi, tetapi pipa baja yang diperbaiki ini akan mendapat beban siklik selama gempa bumi, sehingga timbul pertanyaan penting terkait apakah pipa baja yang diperbaiki akan memiliki kapasitas penyerapan energi yang dibutuhkan.

Gbr. 4 menunjukkan kurva Beban-Penurunan empat jenis pipa yang dibebani tekuk dalam analisis elemen hingga non-linier: (a) pipa utuh (diameter luar 216,3 mm, tebal dinding 12,7 mm); (b) pipa baja dengan tebal dinding yang dikurangi merata 6 mm sepanjang 150 mm; (c) pipa baja dengan tebal dinding yang dikurangi merata 6 mm dan kemudian dilas menggunakan pelat tambalan 6 mm; dan (d) pipa baja dengan tebal dinding yang dikurangi merata 6 mm dan diperbaiki dengan pelat las tambalan 9 mm.

Dari gambar dapat dilihat bahwa, untuk mengembalikan kapasitas serapan-energi pada pipa baja terkorosi menjadi kapasitas pipa utuh, perlu menggunakan tambalan pelat baja dengan tebal lebih dari pengurangan tebal dinding yang diakibatkan korosi.

Gbr. 2 Hubungan Beban-Penurunan Pipa Baja pada Pembebanan Tekuk

Gbr. 4 Kurva Beban-Penurunan Pipa Baja pada Pembebanan Tekuk Siklik

## **Pemeriksaan Karakteristik Las dengan Uji Gelembung Air Laut**

Untuk menunjukkan performa siklus layan, penting untuk mengetahui ketahanan korosi pasca-perbaikan. Dalam praktek saat ini, pelapisan proteksi korosi diaplikasikan pada tiang pancang pipa baja yang sudah diperbaiki dengan cara pengelasan dengan tambalan pelat baja. Foto 1 menunjukkan contoh tiang pancang pipa baja dimana diberikan pelapisan petrolatum dan diberikan penutup FRP. Proteksi korosi ini diyakini efektif untuk sekitar 20 tahun; tetapi bila penutup FRP sudah rusak akibat benda-benda mengapung dan sebagian lapisan petrolatum sudah terkikis, bagian yang diperbaiki ini akan terpapar ke lingkungan korosif lagi. Banyak riset yang dilakukan terkait dengan karakteristik korosi elemen baja di air laut, tetapi sedikit riset yang dilakukan yang membandingkan bagian baja pada umumnya dengan sambungan las untuk melihat perbedaannya terhadap karakteristik korosi.

Dengan kekurangan data ini, kami menggunakan uji akselerasi korosi gelembung (3% larutan NaCl, 50°C, 28 hari) untuk memeriksa karakteristik korosi sambungan las baja. Gbr. 5 menunjukkan garis besar peralatan uji yang digunakan. Dua jenis pelat dasar digunakan sebagai spesimen uji, SY295 dan SYW295, sementara pelat baja SM490 digunakan sebagai pelat penambal. Pelat penambal dan pelat dasar kemudian disambung dengan las dengan cara *fillet welding* menggunakan elektroda las E4319.

Dalam pengujian, profil permukaan sebelum dan sesudah pengujian diukur dan dibandingkan dengan menggunakan *laser displacement sensor* untuk menentukan *corrosion loss* pada las. Gbr. 6 menunjukkan *corrosion loss* pada las salah satu spesimen. Seperti terlihat pada gambar, sambungan las *fillet* menunjukkan korosi seragam, dan tidak banyak korosi setempat akibat ketidak-rataan tetesan las ataupun kaki las. Selain itu, tidak terdapat perbedaan yang signifikan dalam *corrosion loss* akibat arah pengelasan (memanjang atau melintang), jenis baja pelat dasar ataupun akibat lingkungan pengelasan (udara terbuka atau bawah air). Juga ditemukan bahwa *corrosion loss* pada sambungan las serupa dengan yang ada pada pelat baja.

Foto 1 Tiang pancang pipa baja yang diperbaiki dengan pelat tambal dengan pelapis petrolatum dan penutup FRP

Gbr. 5 Sistem Uji Akselerasi Paparan untuk Korosi

Bawah Air

Gbr. 6 Perubahan Profil Permukaan Las akibat Korosi

## **Asesmen Performa Siklus Layan Struktur Baja Pelabuhan**

Dengan tujuan memperbaiki manajemen siklus layan struktur baja pelabuhan, kami memeriksa kapasitas dukung tiang pancang pipa baja terkorosi yang telah diperbaiki dengan pengelasan pelat baja untuk lebih memahami performa siklus layan tiang pancang pipa baja. Tujuan kami ke depannya adalah untuk menilai daya dukung pasca-perbaikan keseluruhan struktur dermaga disamping tiang pancang pipa baja tunggal

■ ■ ■ ■ ■

(Halaman 16~Sampul Belakang)

## **Metode Asesmen Kekuatan Sisa Struktur Baja Pelabuhan yang Rusak karena Korosi**

oleh Kunitomo Sugiura, Profesor, Departemen Teknik Sipil dan Sumber Daya Bumi, Sekolah Teknik, Universitas Kyoto

### **Pengantar**

Karena Jepang dikelilingi laut di segala arah, fasilitas pelabuhan memainkan peranan dalam perkembangan ekonomi dan sosial yang bagus. Sebagai fasilitas logistik, fasilitas pelabuhan biasanya terdiri dari dermaga dan fasilitas labuh lainnya, terusan dan kolam seperti alur pelayaran dan tambatan, dan pemecah gelombang dan fasilitas pelindung lainnya untuk mengamankan area pelabuhan. Sementara pelabuhan sudah menunjukkan perannya dan fungsinya dan hubungan yang efisien antar fasilitas, konstruksinya sendiri telah berusia 30~50 tahun. Dengan situasi tersebut, biaya perawatan pastinya akan meningkat di masa depan, dan karenanya bagaimana merawat fasilitas pelabuhan menjadi masalah penting.

Khususnya di Jepang, infrastruktur sosial seperti jalan raya, sungai dan pelabuhan dibangun dalam periode pertumbuhan ekonomi yang tinggi. Dalam situasi demikian, Kementerian Infrastruktur, Pertanian, Transport dan Pariwisata (MILT) sudah

memperkirakan pengeluaran yang dibutuhkan untuk perawatan di masa depan dan perbaruan berdasarkan pengembalian investasi sebelumnya (jalan raya, pelabuhan, bandara, rumah sewa, pembuangan, taman kota, fasilitas kontrol sungai, pantai). Perhitungan uji coba menunjukkan bahwa pada tahun 2037 biaya perawatan yang dibutuhkan akan melebihi investasi, dan bahwa, perbaikan hanya dengan ¥30 dari biaya perbaikan yang dibutuhkan untuk 50 tahun dari tahun fiskal 2011 sampai 2016 (sekitar ¥190 triliun) tidak akan mungkin diimplementasi. Kenyataan ini menunjukkan bahwa sangat penting menerapkan perawatan yang strategis dan terencana dengan beban sekecil mungkin, dan sejalan dengan itu teknologi siklus layan perawatan perlu segera dikembangkan agar fasilitas yang ada dapat digunakan secara efektif dan masa layan struktur dapat diperpanjang dengan melakukan perbaikan yang tepat.

Pada akhirnya, disamping pentingnya membuat fasilitas baru yang mudah diinspeksi dan diobservasi dan ‘perawatan preventif’ untuk memperpanjang masa layan dari semua fasilitas dengan deteksi kerusakan awal dan perbaikan fasilitas eksisting, penggunaan material dan struktur dengan durabilitas tinggi, pemilihan langkah-langkah untuk memperpanjang masa layan keseluruhan infrastruktur sosial juga diperlukan. Pada akhirnya, tujuannya adalah untuk mengurangi biaya total. (Lihat Gbr. 1)

Gbr. 1 Langkah-Langkah yang Diambil untuk Memperpanjang Masa Layan Fasilitas

Di Jepang, aplikasi turap baja dalam konstruksi dermaga dan fasilitas pelabuhan lainnya dimulai pada tahun 1926 dan aplikasi tiang pancang pipa baja pada paruh kedua tahun 1950an. Karena tingginya pertumbuhan konstruksi di daerah pantai, produk baja ini telah digunakan secara besar-besaran. Fasilitas baja pelabuhan jelas terkena air laut dan terpapar lingkungan berat seperti deviasi muka air dan percikan pasang-surut secara langsung sehingga perilaku korosinya berbeda dengan struktur baja lainnya di darat. Dengan semakin banyaknya aplikasi produk baja untuk fasilitas pelabuhan, banyak dilakukan pemeriksaan mekanisme korosi, berbagai metode proteksi korosi dan metode perbaikan dan penguatan. Sebelum berkembangnya teknologi proteksi korosi, struktur proteksi-tanpa-korosi didisain dengan memberikan *corrosion allowance* (bukan menekan korosi tetapi menambah ketebalan dinding) merupakan jenis yang

paling banyak dibangun, tetapi sekarang sistem proteksi korosi seperti proteksi katodik atau pelapisan/pengecatan semakin banyak digunakan dalam konstruksi struktur baja baru. Sekalipun proteksi korosi struktur ini bertahan selama periode panjang, survei berkala (inspeksi) tetap perlu dilakukan serta juga penting untuk memahami performa sisa agar performa yang dibutuhkan struktur ini tidak berkurang akibat korosi produk baja.

Sementara itu, jelas diketahui bahwa tebal pelat batang baja yang digunakan dalam struktur baja pelabuhan akan berkurang akibat korosi sehingga menurunkan daya dukung tidak saja batang strukturnya melainkan keseluruhan struktur. Oleh karenanya, untuk perawatan, sangatlah penting mengevaluasi dengan tepat performa sisa dari struktur baja yang rusak karena korosi. Untuk mengevaluasi daya dukung sisa struktur baja pelabuhan, berbagai parameter dengan pendekatan analitikal dan eksperimental telah diusulkan untuk evaluasi daya dukung batang baja dimana gaya potongan bekerja. Akan tetapi, kebanyakan pendekatan eksperimental dan analitikal ini diterapkan pada bagian batang struktur dan sering kali tidak dilakukan evaluasi pada keseluruhan struktur.

Selanjutnya, di bawah ini, dengan target sebuah dermaga yang terdiri dari tiang pancang pipa baja dan slab RC (model dengan tiga tiang pancang untuk persiapan rangka bidang, Gbr. 2), hasil pemeriksaan disarikan dalam bentuk efek tiang pancang yang rusak akibat korosi (Gbr. 3) pada kapasitas pembebanan horisontal. Dalam pemeriksaan, spesimen pipa baja disiapkan dengan menarik tiang yang terkorosi selama berada dalam lingkungan laut selama sekitar 19 tahun, kemudian profil korosi diukur dengan *laser displacement gauge* (alat pengukur penurunan laser) dan kemudian profil korosi yang peroleh digunakan sebagai karakteristik korosi pipa tiang pancang baja.

Gbr. 2 Contoh Jembatan Pantai Tipe Tiang Pancang Lurus

Gbr. 3 Tren Korosi Arah Vertikal pada Struktur Lepas Pantai

### **Analisis FEM Dermaga Tipe Tiang Pancang Pipa Lurus dengan dengan Performa Memburuk akibat Korosi**

Struktur rangka bidang (tinggi 10,2 m, jarak tiang 6,5 m), dimana 3 tiang pancang pipa (berdiameter luar 800 mm, tebal dinding 16 mm) diatur parallel dengan jarak tetap digunakan sebagai dermaga model dengan

tiang baja yang performanya memburuk akibat korosi, dan kemudian dilakukan analisis efek rangka bidang terhadap daya dukung dengan beberapa pola kerusakan. Sementara itu, analisis dilakukan dengan kode analisis elemen hingga ABAQUS (Ver. 6.10). Gbr. 4 menunjukkan model rangka bidang sebagai model dermaga dengan tiang pancang pipa terkorosi dalam analisis FEM. Dasar tiang pancang dengan diameter 2,75 kali diameter luar pipa dan ujung atas pipa dengan diameter 2,25 kali diameter luar dibuatkan modelnya dengan menggunakan elemen cangkang (*4 node reduced integration shell element*), dan bagian antara dimodel dengan menggunakan elemen balok. Sementara itu, elemen cangkang dan elemen balok disambung rijid di simpul, fungsi partisipasi arah keliling elemen cangkang pipa baja ditetapkan 150, dan kemudian dilakukan *meshing* pada arah sumbu dengan menggunakan dimensi yang sama. Slab RC harus elastik, dan disambung rijid dengan daerah cangkang pada ujung atas tiang pancang pipa. Tepi dasar tiang pancang pipa dijepit sepenuhnya sebagai kondisi batas, dan penurunan horizontal maksimum sebesar 1.000 mm diberikan pada seluruh slab pada arah horizontal bidang. Baja mutu SKK490 digunakan untuk pipa baja; dan mengenai tebal dinding, angka ketebalan diinput pada tiap simpul (*node*) dari elemen cangkang; dan untuk elemen balok, nilai-nilai sektional potongan sirkuler *hollow* dengan diameter sama diinput menggunakan tebal rata-rata dari tiap elemen.

Gbr. 4 Komposisi Elemen Struktur Rangka Bidang Dermaga

Analisis dilakukan pada tiga kasus: Model A dengan satu tiang pancang; Model Rangka B-1 dengan pola korosi dimana terdapat tiga tiang dengan korosi serupa; dan Model Rangka B-2 dimana hanya satu tiang yang mengalami *corrosion loss* yang besar. Model A dipersiapkan dengan menggunakan tiang pancang yang sama dengan yang digunakan dalam model rangka, dimana elemen rijid dipasang pada tepi ujung atas dan kemudian diberikan penahan rotasi, kemudian dianalisis hingga penurunan horizontal maksimum mencapai 1.000 mm. Dalam analisis ini, *corrosion loss* pada tiap model dirubah menjadi 0 kali (tidak ada korosi), 1,0 kali, 1,2 kali, 1,4 kali, 1,6 kali dan 1,8 kali kriteria korosi yang diperoleh pada pengukuran actual tebal dinding, dan tingkat korosi kemudian dikelompokkan a, b, c, d, e, f, dan kasus mode analitis

ditandai dengan B-[○]-[△]-[□] (○: tiang kiri; △: tiang tengah; □: tiang kanan, dan pola korosi ketiga tiang ini dinyatakan dengan symbol a~f). Karena kondisi korosi berbeda-beda tergantung arah peripheral tiang pancang, kekuatan horizontal pada Model A ditentukan oleh perubahan arah beban horizontal dengan *pitch* 45°, dan sebagai hasilnya kekuatan horizontalnya rata-rata 548 kN (maks. 559 kN, min. 537 kN), dan rentang deviasinya berada dalam 4% nilai rata-rata

Gbr. 5 menunjukkan contoh hubungan antara beban horizontal dengan penurunan horizontal (Model B-1). Daya dukung berkurang sekitar 14,2% dari tingkat awalnya (B-a-a-a) akibat berkembangnya korosi (B-b-b-b) karena terpapar selama 19 tahun. Daya dukung juga berkurang masing-masing 18,3% dan 25,7% sejalan dengan bertambahnya *corrosion loss* 1,2 kali (B-c-c-c) dan 1,4 kali (B-d-d-d). Penurunan pada pembebanan maksimum juga menjadi lebih kecil dibanding tingkat awalnya dengan bertambahnya *corrosion loss*. Disamping itu, dengan bertambahnya korosi, terlihat berbagai perubahan pada reaksi sumbu pada tiap tiang pancang, dan perubahan besar pada perilaku tekuk dan daya dukung sehingga diketahui apakah performa keseluruhan struktur sudah perlu dievaluasi.

Sementara itu, dengan pemilihan tiang pancang terkorosi dengan Model B-1, pada kasus dimana korosi bertambah dengan cepat hanya pada satu tiang, pembebanan dapat diterima oleh tiang lainnya, sehingga diketahui bahwa kapasitas dukung keseluruhan struktur tergantung pada *corrosion loss* total dari keseluruhan struktur.

Gbr. 5 Contoh Hubungan Beban-Penurunan

### Evaluasi performa Dermaga yang Rusak karena Korosi Berdasarkan Pengukuran di Lapangan.

Dengan asumsi bahwa pengukuran lapangan dilakukan untuk mendapatkan ketebalan dinding berdasarkan “Pencegahan Korosi Struktur Baja Pelabuhan: Manual Perbaikan,” diperoleh tebal dinding representatif tiang pancang pipa baja terkorosi dari dermaga model. Dalam mengekstraksi nilai ketebalan, bagian dengan tebal minimum dipilih dari bagian di zona percikan, pasang-surut dan benaman, dan dipilih titik pengukuran 4-atau 8-arah di bagian yang identik dengan titik awal adalah titik ketebalan minimum (Gbr. 6). Selanjutnya, dalam area 10 cm<sup>2</sup> ditentukan 5 titik termasuk 4 titik yang saling berjarak sekitar 3,2 cm kearah memanjang dan melintang dari titik awal, dan

tebal rata-rata yang diperoleh ditetapkan sebagai nilai ketebalan dari pengukuran lapangan yang akan digunakan untuk evaluasi (Gbr. 7)

Gbr. 6 Contoh Posisi Pengukuran dalam Arah Tinggi dan Melingkar

Gbr. 7 Arah Pengukuran Tebal Dinding dalam Area 10 cm<sup>2</sup>

Analisis ditargetkan pada 1 tiang (diameter luar 406,4 mm; panjang 10,5 m, tebal awal 9 mm, mutu baja SKK490). Dalam model analitis, Ave-[ ] pada Gbr.8 menunjukkan model yang mengadopsi tebal rata-rata pada tiap bagian seperti pada gambar; 4d menunjukkan model dimana 4 titik untuk pengukuran tebal ditentukan dalam arah melingkar pada saat memilih titik pusat pengukuran dengan tebal maksimum sebagai awal, dan 8d menunjukkan model dimana dipilih 8 titik. Selanjutnya, B-[ ]-[ ]-[ ] (contohnya B-4-4-4 pada gambar) menunjukkan model yang tidak mengadopsi tebal rata-rata pada tiap bagiannya melainkan memisahkan bagian tersebut pada arah memanjang tergantung pada arah pengukuran tebal. Tebal dinding dapat dihitung dengan memasukkan nilai pengukuran pada tiap bagian terpisah dalam analisis. [ ] menunjukkan nomor arah pengukuran tebal dalam zona percikan, pasang-surut dan benam (dari kiri ke kanan). Sementara itu, s-Det menunjukkan model dimana profil korosi direproduksi dengan rinci; dan, karena tebal rata-rata, interpolasi linier dan asumsi lainnya dimasukkan pada bagian yang tidak diukur, kasus analisis ini diasumsikan sebagai kasus dimana pengukuran tebal dilakukan dengan sangat rinci, dan daya dukung horizontal tiang pancang pipa dievaluasi dengan akurasi tinggi.

Gbr. 8 menunjukkan hubungan beban-penurunan masing-masing model analitis. Marjin kesalahan dalam hal daya dukung horizontal yang diperoleh dari perbandingan dengan s-Det adalah sebesar 16,8% untuk Ave-4d dan 13,1% untuk B-4-4-4. Dengan adanya 4 titik tiap bagian untuk pengukuran di lapangan dalam manual yang ada, dapat dilihat diatas bahwa daya dukung model dievaluasi untuk sisi aman (pada level rendah) ketika dibandingkan dengan daya dukung aktual. Hal ini disebabkan karena angka ketebalan bagian yang mempunyai tebal minimum dimasukkan sebagai tebal dinding tiang pancang pada keseluruhan zona percikan, sehingga ketebalan yang lebih kecil yang digunakan pada seluruh zona. Untuk mengevaluasi dengan tepat daya dukung, perlu

mereproduksi kekuatan di zona percikan yang terkena efek momen tekuk yang besar yang terjadi disana dan dimana terdapat deviasi ketebalan yang besar.

Gbr. 8 Hubungan Beban-Penurunan Model Tiang Pancang Pipa Berdasarkan Pengukuran Visual di Lapangan

Selanjutnya, ketika memeriksa hasil dimana nomor bagian pengukuran pada zona percikan dan zona pasang-surut ditingkatkan menjadi 2 atau 3, dan ketika hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil s-Det, kurva beban-penurunan yang lebih dekat dengan s-Det dapat diperoleh dengan meningkatkan nomor area pengukuran. Inilah yang dianggap mengakibatkan tebal rata-rata per bagian dengan tingkat akurasi tertentu dapat dihitung dengan meningkatkan jumlah bagian pengukuran. Akhirnya, sekalipun pengukuran di lapangan menghadapi berbagai kesulitan, diharapkan dapat dilakukan pengukuran ketebalan dengan menggunakan banyak bagian untuk tiap area dimana karakteristik korosi dianggap hampir sama, dan juga dalam pengukuran ketebalan penggunaan empat titik tiap 90<sup>0</sup> dalam satu bagian dianggap cukup.

## Kesimpulan

Sebagai hasil analisis rangka bidang untuk dermaga tipe tiang pancang pipa baja, diketahui bahwa lokasi tiang yang terkorosi parah memberi efek yang lebih kecil terhadap daya dukung, dan bahwa daya dukung keseluruhan struktur tergantung pada *corrosion loss* keseluruhan struktur. Selain itu, salah satu hasil evaluasi daya dukung sisa dengan pengukuran tebal dinding tiang pancang pipa di lapangan dengan menggunakan manual yang ada sekarang, diketahui bahwa dengan marjin kesalahan 13% atau lebih untuk perbandingan terhadap daya dukung dimana korosi dimodelkan dengan rinci, dapat diperoleh daya dukung untuk sisi aman.

Selanjutnya, sekalipun pengukuran tebal pada 4 titik dalam satu bagian dianggap memadai, khususnya pada zona percikan dimana terdapat deviasi besar pada tebal dinding, perlu dilakukan revisi ketebalan yang diukur dengan menggunakan deviasi standar, dan sangat disarankan untuk mengukur ketebalan pada beberapa bagian. Pemeriksaan rinci disarankan untuk pendekatan pengukuran ideal di lapangan dimana daya dukung struktur dermaga dapat dievaluasi dengan tepat secara rekayasa dengan menerapkan hasil pengukuran terbatas di lapangan.

