



Pengaruh *Camber* Vertikal Dan Lateral Terhadap Stabilitas Pc-I Girder Dan Penanganannya Terhadap *Roll Over*

M Darmawan Putra^a, Ratna Widyawati^b, Aleksander Purba^c

^a PT Waskita Karya (Persero) TBK, Jalan MT Haryono No.Kav. 12-13, RT.4/RW.11, Bidara Cina, Jatinegara, Jakarta Timur 13330

^{b,c} Program Profesi Insinyur, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima : 6 Maret 2023

Direvisi : 13 April 2023

Diterbitkan : 2 Desember 2023

Kata kunci:

PC-I Girder Post Tension

Camber PC-I Girder

Stabilitas PC-I Girder

Roll over PC-I Girder

Penanganan PC-I Girder

ABSTRAK

PC-I Girder *post tension* merupakan gelagar beton prategang yang umum digunakan pada konstruksi jembatan. Proses pekerjaan PC-I Girder *post tension* dimulai dari tahap desain, produksi, *stressing*, hingga *erection* PC-I Girder. Pada tahapan *erection* PC-I Girder perlu dilakukan beberapa pengecekan sesuai metode kerja mulai dari kinematika *erection*, alat angkat, dan material PC-I Girder itu sendiri. Segmental PC-I Girder disatukan dengan dilakukan *stressing* sesuai dengan analisa tahapan – tahapan *stressing*. Hasil dari *stressing* PC-I Girder akan mengakibatkan girder tersebut mengalami perubahan bentuk akibat adanya gaya dari tarikan *jacking force* sehingga terwujudnya *camber* vertikal dan lateral. Hal ini akan mempengaruhi stabilitas pada saat proses *erection* dan perlu dilakukan pengecekan *safety factor* terhadap stabilitas girder tersebut. Apabila dari girder tersebut memiliki *safety factor* yang rendah maka perlu dilakukan *treatment* pada girder tersebut untuk meningkatkan stabilitas girder terhadap *roll over* dan *crack*. Cara untuk meningkatkan stabilitas tersebut memiliki banyak metode antara lain penambahan stiffener pada girder, merubah titik angkat girder, menaikkan sumbu putar pada titik angkat girder.

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Konstruksi jalan tol tidak hanya pekerjaan *at grade* saja tetapi terdapat juga konstruksi seperti *slab on pile* dan atau jembatan sesuai dengan kondisi eksisting yang bersinggungan dengan alinyemen jalan tol tersebut. Jembatan merupakan jalan penghubung dimana pada suatu kondisi eksisting terdapat rintangan seperti jalan eksisting, rawa, danau, atau sungai.

Jembatan terdiri menjadi dua bagian yaitu struktur bawah (*sub structure*) dan struktur atas (*upper structure*). Struktur bawah terdiri dari pondasi, *pilecap*, kolom, *pierhead*, dan untuk struktur atas terdiri dari girder, diafragma, lantai kendaraan, dan parapet.

Girder adalah gelagar jembatan yang bertumpu pada pilar yang berfungsi sebagai penyalur beban dari beban kendaraan dan berat sendiri girder untuk disalurkan ke struktur bawah jembatan. Girder pada umumnya terbuat dari material beton dan baja dan berbentuk I, T, U, *box*.

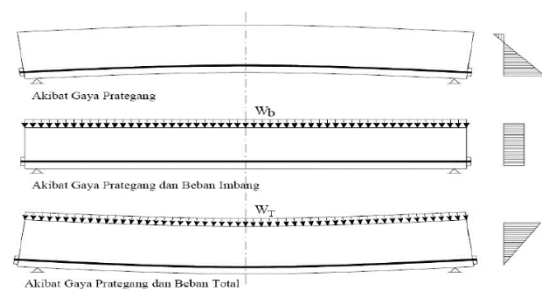
Beton prategang merupakan salah satu jenis beton dimana beton yang terdapat tulangan baja yang ditarik atau ditegangkan dengan gaya yang ditentukan terhadap beton tersebut. Menurut Lin dan Burns (1982), ada tiga konsep yang digunakan untuk

menjelaskan dan menganalisis sifat – sifat dasar dari beton prategang sebagai berikut.

1. Sistem prategang yang mengubah beton menjadi bahan yang elastis. Beton merupakan bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan terlebih dahulu (*pratekan*) pada girder sehingga mampu memikul tegangan tarik.

Gambar 1. Girder akibat gaya prategang dan gaya eksternal (sumber: Aboe, 2006)

2. Sistem prategang untuk mencapai keseimbangan beban.



Sebagai contoh tendon dengan profil parabola ditarik, maka untuk dapat mempertahankan posisinya diperlukan gaya vertikal kebawah. Karena tendon terbungkus beton, maka akan timbul gaya keatas menekan beton, yang

berlawanan arah dengan gaya untuk mempertahankan posisi tendon (Aboe, 2006).

3. Sistem prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton. Sistem ini sebagai kombinasi untuk menahan gaya eksternal yang mampu terhadap tekanan dan tarikan.

Sistem penarikan baja prategang pada girder terdapat dua metode yaitu pratarik (*pretensioning*) dan pengangkuran ujung, dan paskatarik (*posttensioning*) dengan metode penarikan kabel. Pada umumnya untuk girder penarikan baja prategang menggunakan metode paskatarik (*posttensioning*). Hal ini dipilih karena adanya beberapa faktor seperti Keterbatasan lahan, biaya produksi lebih efisien dan mutu terjaga, kemudahan pelaksanaan untuk mobilisasi karena girder dikirim segmental.

1.2. Permasalahan

Pelaksanaan PC-I Girder *posttensioning* dari tahap produksi, mobilisasi, *stressing*, hingga *erection* girder itu sendiri perlu dilakukan pengecekan sehingga ketika girder diangkat ke atas pilar dapat duduk dan tidak mengalami *collapse*. Segmental PC-I Girder disatukan dengan dilakukan *stressing* sesuai dengan analisa tahapan – tahapan *stressing*. Hasil dari *stressing* PC-I Girder akan mengakibatkan girder tersebut mengalami perubahan bentuk akibat adanya gaya dari tarikan *jacking force* sehingga terwujudnya camber vertikal dan lateral. Hal ini akan mempengaruhi stabilitas pada saat proses *erection* dan perlu dilakukan pengecekan *safety factor* terhadap stabilitas girder tersebut.

1.3. Maksud dan Tujuan

Adapun maksud dan tujuan dari penulisan ini antara lain:

1. Pengaruh camber vertikal dan horizontal terhadap stabilitas PC-I Girder
2. Penanganan untuk meningkatkan stabilitas PC-I Girder pada saat proses pengangkatan

2. Metodologi

2.1 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penulisan ini menggunakan penjelasan – penjelasan dalam jurnal atau artikel dan berdasarkan pengamatan penulis dalam melaksanakan pekerjaan di lapangan.

2.2 Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan berdasarkan tahapan – tahapan *stressing* PC-I Girder, metode pekerjaan *stressing* PC-I Girder, keberterimaan *stressing* PC-I Girder, dan perhitungan stabilitas PC-I Girder.

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Camber Vertikal dan Lateral PC-I Girder

Camber vertikal dan lateral PC-I Girder terjadi akibat adanya *stressing* pada PC-I Girder. Tahapan – tahapan dan pola *stressing* PC-I Girder ditentukan berdasarkan analisa tarikan *stressing* PC-I Girder dari *Precaster*. Berikut adalah contoh tahapan dan pola penarikan pekerjaan *stressing* PC-I Girder.

Gambar 2. Ilustrasi *layout* tendon *stressing* girder
(Sumber: PT. Waskita Beton Precast)

Didalam analisa tersebut tercantum urutan – urutan penarikan

Tahap	Tendon	% Penarikan Thd Gaya Rencana	Arah Sisi Penarikan
1	C2	100%	Sisi I
2	C3 dan C4 (*)	25%	Sisi I dan Sisi II
3	C3 dan C4 (*)	50%	Sisi I dan Sisi II
4	C3 dan C4 (*)	75%	Sisi I dan Sisi II
5	C3 dan C4 (*)	100%	Sisi I dan Sisi II
6	C1	100%	Sisi I

per tendon dengan presentase tegangan tarikan tertentu pada *jacking force* sehingga hasil dari pekerjaan tersebut akan menghasilkan camber vertikal dan lateral yang sesuai dan masih dalam batas toleransi. Adapun hal – hal yang perlu diperhatikan sebelum dilakukan pekerjaan *stressing* antara lain:

1. Material PC-I Girder sudah dilakukan keberterimaan pengujian *quality control* dari mutu beton, pengujian strand, tendon, *bursting steel*, *match casting* antar segmen telah sesuai
2. Landasan tanah dasar pada *sleeper bed* minimal memiliki kepadatan CBR 6% serta tidak ada kemiringan pada *sleeper bed*. Apabila tanah dasar tersebut tidak cukup padat maka perlu dilakukan perbaikan tanah dasar tersebut sesuai dengan metode yang disetujui.
3. Perhitungan, tahapan, dan pola penarikan harus sudah mendapat persetujuan dari pihak konsultan dan *owner*.
4. Alat *jacking force* telah terkalibrasi.
5. Aspek keselamatan dalam pekerjaan *stressing*.

Pekerjaan *stressing* PC-I Girder memiliki beberapa tahapan antara lain:

1. Penyusunan segmental girder sesuai dengan urutan dan kode produksi. Pastikan segmen – segmen girder lurus dan level sama.
2. Penyusunan jarak antar segmen girder 10 – 15 cm untuk memudahkan pelaksanaan *epoxy* menjadi maksimal.
3. Penyusunan jarak antar bentang girder 50 – 60 cm dalam satu *sleeper bed*.
4. Instalasi *strand* per masing – masing tendon sesuai dalam *shopdrawing*.
5. Instalasi *epoxy* antar segmen – segmen PC-I Girder secara merata.
6. Penarikan *strand* sesuai *staging stressing* PC-I Girder.
7. Dilakukan pencatatan pada setiap pekerjaan tahapan *stressing* dan batas elongasi *stressing* masih memenuhi kriteria ($-7\% < \text{deviasi} < +7\%$).
8. Pengamanan pekerjaan *stressing* PC-I Girder untuk meminimalisir resiko kecelakaan dalam bekerja.
9. Pemotongan *strand*, *patching*, *grouting*, dan *finishing*.
10. Pengecekan camber vertikal dan lateral dan dimonitoring secara berkala sampai sebelum pekerjaan *erection*.

Tabel 1. Ilustrasi Tahapan Dan Pola Penarikan *Stressing* Girder
(Sumber: PT. Waskita Beton Precast)

Pengamatan dan pencatatan pada setiap *staging stressing* PC-I Girder menjadi hal penting dikarenakan untuk mengetahui *elongasi* pada masing – masing tendon. Dari hasil tersebut akan dilakukan monitoring dan ditinjau apakah terdapat anomali atau tidak. Berikut adalah contoh pencatatan *staging stressing* dan monitoring *elongasi*.

STRESSING RECORD									
Project Name : Pembangunan Jalan Tol Cipinang-Pondok Kelapa (Cipinang-Pondok Kelapa Toll Road)									
Drawing No : 13100141									
Drawing Title : STRESSING RECORD									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									
Drawing Remark : 1.0									
Drawing Detail : 1.0									
Drawing Note : 1.0									
Drawing Signature : 24/07/22									
Drawing Stamp : 24/07/22									
Drawing Seal : 24/07/22									
Drawing Initial : 24/07/22									
Drawing Mark : 24/07/22									
Drawing Date : 24/07/22									
Drawing By : PT WASKITA PRIMA									
Drawing Check : 24/07/22									
Drawing Approved : 24/07/22									
Drawing Scale : 1:1									
Drawing Unit : mm									
Drawing Status : OK									
Drawing Version : 1.0									

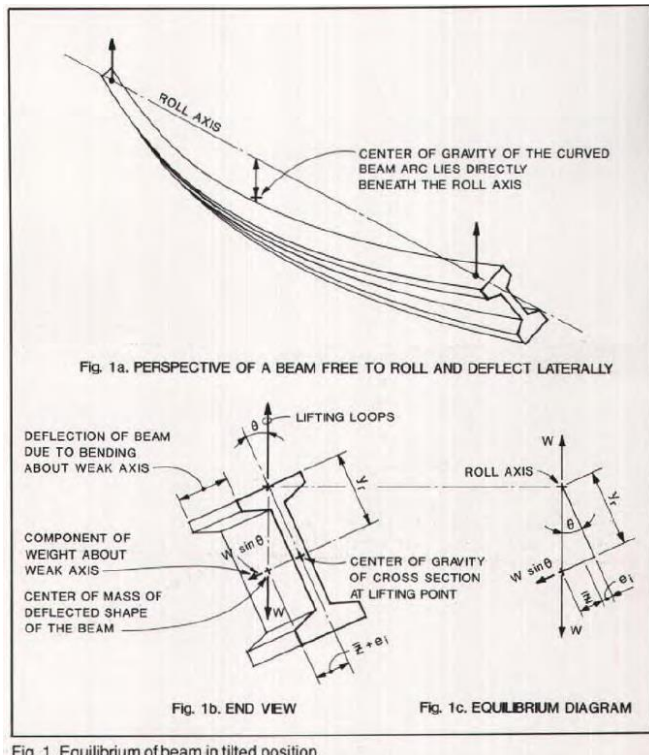


Fig. 1. Equilibrium of beam in tilted position.

Gambar 5. Keseimbangan balok pada posisi miring
(Sumber: Robert F. Mast)

Menurut Robert F. Mast (1989), kestabilan dan keamanan ketika balok gantung bergantung pada empat besaran:

1. e_i = eksentrisitas lateral awal dari pusat gravitasi balok terhadap sumbu roll
2. y_r = ketinggian sumbu roll diatas pusat gravitasi dari balok
3. Z_0 = lateral teoritis dari pusat gravitasi balok, dihitung dengan beban mati yang diterapkan secara lateral
4. θ_{max} = kemiringan maksimum yang diizinkan sudut balok

Terlihat bahwa camber vertikal (y_r) dan lateral (e_i) sangat mempengaruhi stabilitas girder saat gantung. Stabilitas girder saat gantung sangat tergantung pada beban sendiri girder dan beban eksternal seperti *stiffner*, kecepatan arah angin, ketidaksempurnaan *lifting loop* pada girder yang eksentris terhadap *lifting point* / *roll axis* (Z_0). Lateral pada girder menyebabkan girder berputar pada sumbu *roll axis*-nya dan akan terus terdeformasi (*time dependent*) sampai girder tersebut mendapatkan kesetimbangan pada girder (*equilibrium*) atau girder mengalami kegagalan (*disequilibrium*).

3.3 Penanganan Untuk Meningkatkan Stabilitas Girder Saat Proses Pengangkatan

Menurut Robert F. Mast (1989), faktor keamanan bersih atau balok gantung, setelah memperhitungkan ketidaksempurnaan awal, adalah faktor keamanan yang lebih rendah yang dihitung dari dua persamaan berikut:

$$FS = \frac{y_r}{Z_0} \left(1 - \frac{\theta_i}{\theta_{max}}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$FS = \frac{\theta_{max}}{\theta_i} \left(1 - \frac{Z_0}{y_r}\right) \dots\dots\dots (2)$$

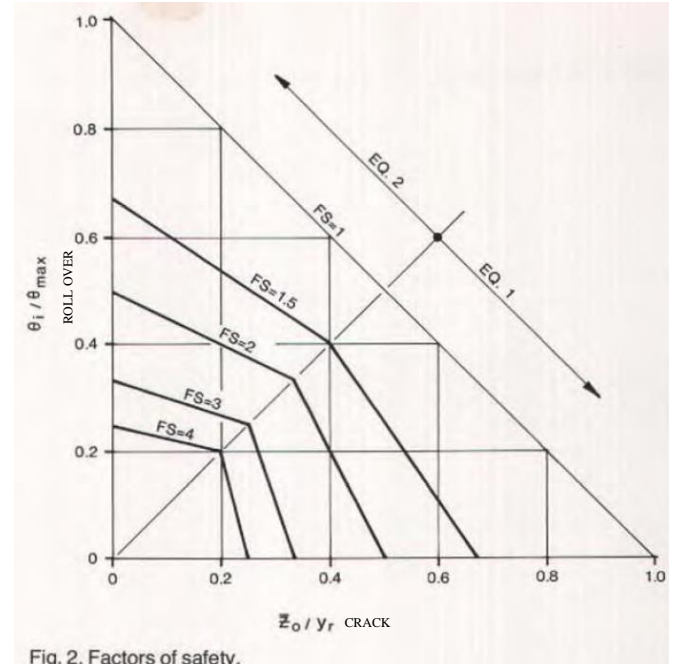


Fig. 2. Factors of safety.

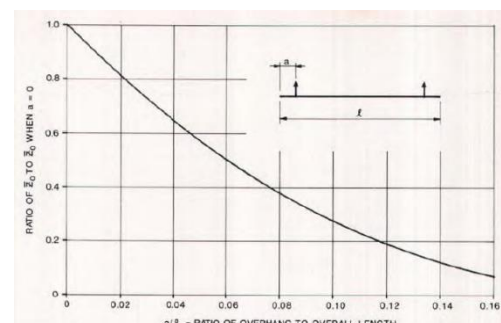
Gambar 6. Factor of Safety
(Sumber: Robert F. Mast)

Ketidakseimbangan girder pada saat proses gantung atau pengangkatan tidak bisa tidak dihindari. Hasil analisa *factor of safety* stabilitas girder sesuai persamaan tersebut akan mengeluarkan nilai apakah girder masih dibatas aman terhadap *crack* dan atau *roll over* atau tidak. Menurut Imper dan Laszio (1987), berdasarkan pengalaman pabrik dan lapangan (dan nilai aktual β_y), kami menggunakan faktor keamanan berikut:

1. Penanganan di pabrik: $F.S > 1,5$
2. Penanganan di lapangan (*erection*): $F.S. > 1,75$

Menurut Robert F. Mast (1989), ada beberapa cara untuk meningkatkan stabilitas balok antara lain:

1. Pindahkan titik pengangkatan ke dalam. Sejauh ini adalah cara yang paling efektif untuk meningkatkan stabilitas lateral ketika menggantung. Memindahkan titik pengangkatan beberapa persen dari panjangnya bisa lebih dari dua kali lipat faktor keamanannya.

Gambar 7. Reduksi Z_0 dengan menggantung

(Sumber: Robert F. Mast)

2. Tegangan atas harus diperiksa. Imper dan Laszio telah menyarankan untuk menggunakan *post tensioning* sementara pada sayap atas girder jika perlu untuk mengontrol tegangan atas.

Gambar 8. *Post tensioning* sementara pada sayap atas girder

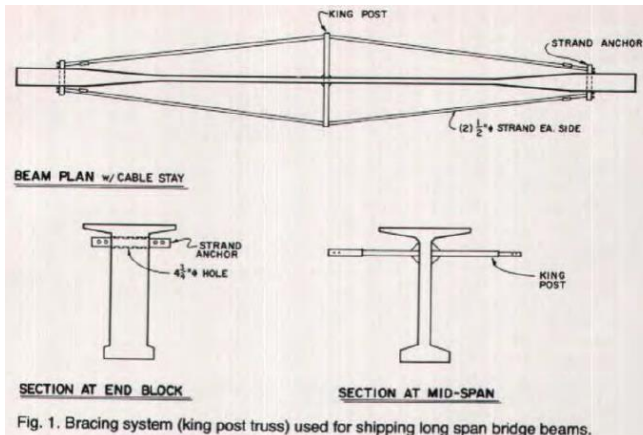


Fig. 1. Bracing system (king post truss) used for shipping long span bridge beams.

(Sumber: Imper dan Laszio)

3. Angkat atau meninggikan sumbu gulungan. Hal ini dapat dilakukan dengan menyediakan kuk yang melekat pada balok titik pengangkatan, atau menggunakan sepasang *loop* pengangkatan miring. Kedua metode ini dapat secara efektif menaikkan sumbu roll dengan satu atau dua kaki.



Gambar 9. Sistem pengangkatan kaku yang diperpanjang
(Sumber: Precast/Prestressed Concrete Institute)

4. Meningkatkan modulus elastisitas E. Karena E bervariasi sebagai kuadrat akar dari kekuatan beton, peningkatan f_c' , dan oleh karena itu E hanya menghasilkan sedikit peningkatan stabilitas lateral.
5. Menambahkan *bracing*. Metode yang umum digunakan ini adalah salah satu metode yang kurang efektif. Besaran Z_0 ditentukan oleh kekakuan lateral atau *member*, dan *bracing*.
6. Modifikasi penampang balok. Hal ini biasanya tidak dapat dilakukan pada proyek tertentu. Ketika bentuk balok dapat diubah, penting untuk menyadari bahwa sayap bawah memberikan kontribusi yang sama besarnya terhadap stabilitas lateral seperti halnya pada sayap atas.

Selain enam poin tersebut ada satu hal untuk meningkatkan stabilitas girder saat pengangkatan yaitu menggunakan *stiffner* pada balok. *Stiffner* yang umum digunakan yaitu *stiffner* badan

menggunakan material hollow yang dirangka menyeluruh dari pada badan girder. *Stiffner* badan ini mampu meningkatkan tahanan lateral torsi sebesar 15%, dan dapat menambah kekakuan girder yang mengalami *lateral sweep*. Selain *stiffner* badan, ada juga yang menggunakan *stiffner* sayap atas atau *top stiffner*. *Top stiffner* merupakan produk inovasi dari PT. Waskita Beton Precast. *Top stiffner* menggunakan profil baja yang dipasang pada sayap atas balok yang mampu meningkatkan tahanan lateral torsi sebesar 269%.

(a)



(b)

Gambar 10. (a). Contoh *stiffner* badan (sumber: PT. Waskita Karya);
(b). Contoh *top stiffner* (sumber: PT. Waskita Beton Precast)

4. Kesimpulan

PC-I Girder yang merupakan salah satu girder *post tensioning* yang dipastikan mengalami perubahan bentuk akibat adanya gaya dari tarikan *jacking force* sehingga terwujudnya camber vertikal dan lateral. Camber vertikal dan lateral yang terbentuk kemungkinan akan terjadi ketidakseimbangan pada saat proses gantung yang menyebabkan girder berputar pada sumbu roll axis-nya dan akan terus terdeformasi (*time dependent*) sampai girder tersebut mendapatkan kesetimbangan pada girder (*equilibrium*) atau girder mengalami kegagalan (*disequilibrium*).

Dalam aspek keselamatan dalam saat proses gantung ada beberapa cara untuk meningkatkan stabilitas pada girder seperti pemindahan titik angkat, penambahan *post tensioning* sementara pada sayap atas girder, meninggikan titik angkat saat proses gantung, meningkatkan modulus elastisitas E, menambah *bracing*, memodifikasi penampang balok, dan menambah kekuatan *stiffner* pada girder. Pemilihan cara – cara tersebut bergantung pada kondisi tertentu seperti lokasi pekerjaan, alat angkat dan angkut yang digunakan, metode kinematika erection, dan sebagainya. Pemilihan cara tersebut harus sudah mendapatkan persetujuan dari konsultan pengawas dan pemilik proyek tersebut.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dan membantu dalam penulisan ini. Kepada tim Proyek KAPB3B PT. Waskita Karya, Center of Excellence PT. Waskita Karya, dan PT. Waskita Beton Precast. Semoga bermanfaat bagi kita semua.

Daftar pustaka

- Center of Excellence Division, Project Engineering 3 Department, PT Waskita Karya (Persero) .Tbk (2023)
Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams
Center of Excellence Division, Project Engineering 3 Department, PT Waskita Karya (Persero) .Tbk (2023)
Best Practice Penanganan PCI Girder

Precast/Prestressed Concrete Institute (2016)
Recommended Practice for Lateral Stability of Precast,
Prestressed Concrete Bridge Girder CB-02-16-E
PT. Waskita Beton Precast, Tbk
Metode Trial Stiffener Sayap dan Erection PCI Girder
Bentang 45,8 m
Robert F. Mast, Chairman of the Board ABAM Engineers, A
member of the Berger Group, Federal Way, Washington (1989)
Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beam Part 1