

BAB III

DATA DAN METODE PENGANALISAAN

3.1 Data PC. Box Girder Yang Digunakan Sebagai Bahan Analisa

Data bentang PC.box girder yang akan dianalisa sesuai dengan gambar bestek yang digunakan di lapangan. Di mana bentang 35 m yang mengapit bentang 55 m, juga ikut dianalisa sebagai distribusi beban pada bentang 55 m, karena kedua jenis bentang ini adalah menerus di tumpuan P5 dan P6. Namun khusus untuk data Box girder bentang 55 m, yang utama dianalisa adalah tegangan, kabel strands, penulangan torsi box girder.

Adapun data PC. Box girder sebagai berikut:

1. Data PC. Box girder bentang 35 m typical dua buah di kiri kanan adalah:

Untuk box girder sebagai berikut:

Panjang bentang	= 35 m (3500 cm)
Tinggi PC. Box girder bervariasi	= 190 s/d 280 cm
Lebar plat bawah penampang (bervariasi)	= 1263 s/d 1314 cm
Lebar plat atas penampang (termasuk sayap)	= 1780 cm
Lebar plat sayap box girder	= 189 cm
Tebal plat bawah tengah bentang	= 20 cm
Tebal plat bawah daerah tumpuan (variasi)	= 20 s/d 40cm
Tebal badan dalam vertikal box girder typical 2 buah	= 50 cm
Tebal badan miring luar box girder typical 2 buah	= 47,8 cm
Jarak anatar badan box girder etc (s)	= 419 cm

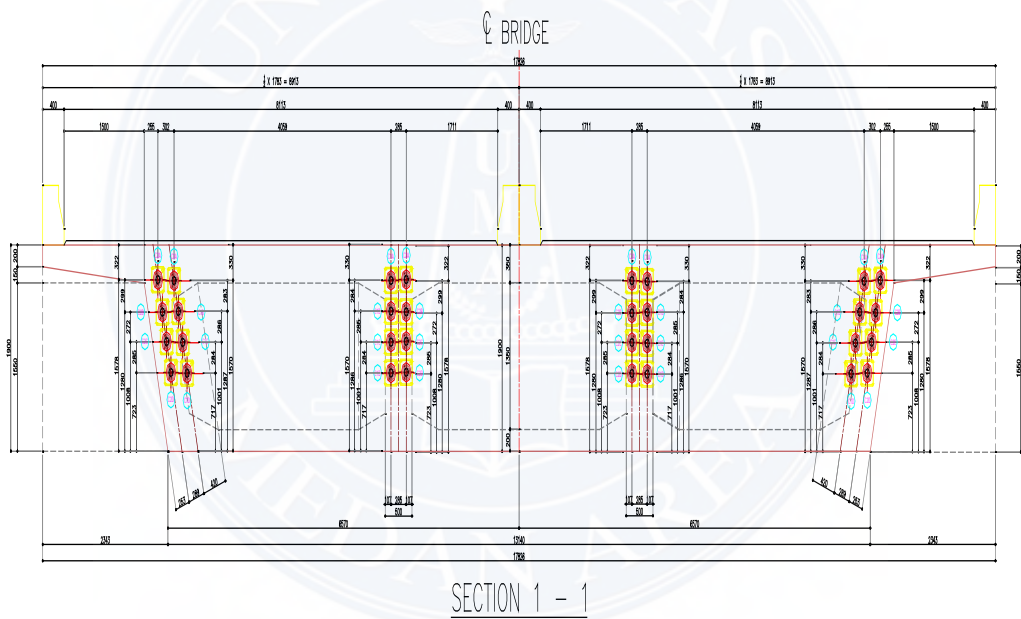
Untuk diaphragma:

Panjang rata-rata diaphragma	= 1158 cm
Tinggi diaphragma tengah variasi	= 201 dan 243 cm
Tebal diaphragma tengah	= 30 cm
Tebal diaphragma ujung (tumpuan)	= 150 dan 100 cm
Jumlah diaphragma tengah per bentang	= 2 buah
Beton sandaran / barrier ;	
Panjang	= 35 m
Tinggi	= 110 cm
Tebal atas dinding sandaran	= 30 cm
Tebal bawah dinding sandaran	= 40 cm
Untuk topping (tambahan beton top plat atas) kemiringan 2% ;	
Tebal topping	= 16,8 cm
Untuk aspal:	
Tebal aspal	= 5 cm
Untuk kerb median	
Tebal atas kerb (typical 2 buah)	= 15 cm
Tebal bawah kerb (typical 2 buah)	= 21 cm
Tinggi kerb (typical 2 buah)	= 30 cm
Panjang kerb (typical 2 buah)	= 35 m
Untuk beton/design concrete sebagai berikut:	
Kuat tekan beton pada 28 hari	= 500 kg/cm ²
Kuat tekan beton pada saat transfer	= 500 kg/cm ²
Untuk kabel strand sebagai berikut:	
sesuai ASTM A 416 atau JIS G 3536	

Diameter nominal strand	= 12,7 mm
Minimum ultimate strength, f_{pu}	= 190 kg/mm ²
Minimum yield strength	= 161,5 kg/mm ²
Luas nominal potongan	= 98,71 mm ²
Jumlah tendon per titik	= 12 strand dan 7
Jumlah baris tendon per web garis di ujung	= 4 baris, 2 kolom
Tendon yang dipakai low relaxation / relaksasi rendah	

Potongan melintang bentang 35 m, typical dengan gambar berikut :

Potongan 1-1 (diaphragma ujung)



Gambar 3.1 Potongan 1-1 Box girder (diaphragma ujung)

2. Data PC. Box girder bentang 55 m adalah:

Untuk box girder;

Panjang bentang = 55 m (5500 cm)

Tinggi PC. Box girder bervariasi = 190 s/d 280 cm

Lebar plat bawah penampang (bervariasi) = 1263 s/d 1314 cm

Lebar plat atas penampang (termasuk sayap)	= 1780 cm
Lebar plat sayap box girder	= 189 cm
Tebal plat bawah tengah bentang	= 20 cm
Tebal plat bawah daerah tumpuan (variasi)	= 20 s/d 55,4cm
Tebal badan (web) vertikal box girder typical 2 buah	= 50 cm
Tebal web miring luar box girder typical 2 buah	= 50 cm
Jarak dinding box girder etc (s)	= 419 cm
Untuk diaphragma:	
Panjang rata-rata diaphragma	= 1158 cm
Tinggi diaphragma tengah variasi	= 215 dan 190 cm
Tebal diaphragma tengah	= 30 cm
Tebal diaphragma ujung (tumpuan) 2 buah	= 100 cm
Jumlah diaphragma tengah per bentang	= 3 buah
Beton sandaran handrail ;	
Panjang sandaran	= 55 m
Tinggi sandaran /barrier	= 110 cm
Tebal atas dinding sandaran	= 30 cm
Tebal bawah dinding sandaran	= 40 cm
Untuk topping kemiringan 2%:	
Tebal topping / lapisan beton cor top	= 16,8 cm
Untuk aspal;	
Tebal aspal	= 5 cm
Untuk kerb median:	
Tebal atas kerb (typical 2 buah)	= 15 cm

Tebal bawah kerb (typical 2 buah) = 21 cm

Tinggi kerb (typical 2 buah) = 30 cm

Panjang kerb (typical 2 buah) = 55 m

Untuk beton/design concrete sebagai berikut:

Kuat tekan beton pada 28 hari = 500 kg/cm²

Kuat tekan beton pada saat transfer = 500 kg/cm²

Humidity / kelembaban (H) = 70%

Untuk kabel strand sebagai berikut:

sesuai ASTM A 416 atau JIS G 3536

Diameter nominal strand = 12,7 mm

Minimum ultimate strength, f_{pu} = 190 kg/mm²

Minimum yield strength = 161,5 kg/mm²

Luas nominal potongan = 98,71 mm²

Jumlah tendon per titik pada row 1 dan 2 = 12 strand

Jumlah baris tendon per web di tengah bentang = 7 baris, 3 kolom

Koefisien gesek μ = 0,25/rad

Koefisien wobble K = 0,004 rad/m

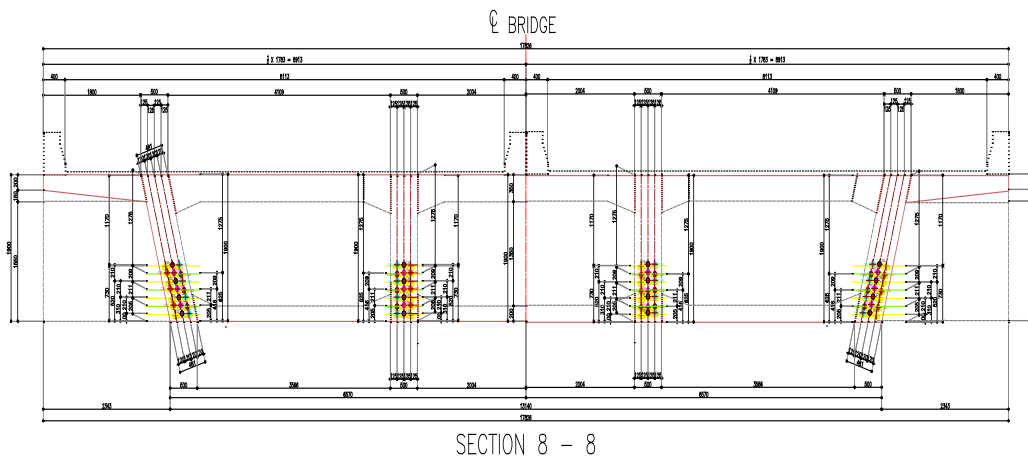
Slip = 7 mm

Tendon yang dipakai low relaxation / relaksasi rendah

Baja tulangan yang dipakai:

Mutu baja = U-39, $f_{sy} = 3900 \text{ kg/cm}^2$

Diameter nominal (D) = 25mm, 22mm, 16mm



Gambar 3.2 Potongan 8-8 Box girder (di tengah bentang)

Sumber : Shop drawing dari PT. Wijaya Karya tbk

3.2 Analisa Mutu beton PC. Box Girder berlubang dengan K-500

Langkah dan rumus yang digunakan untuk menganalisa mutu beton K-500 sebagai berikut:

- a. Kuat tekan beton K-500 kg/cm^2

$$(f_c') = 0,83 \times (K/10) = \text{MPa}$$

rumus untuk modulus elasticitas adalah

Untuk beton normal:

$$E_c = 57.000 \sqrt{f_c'} \text{ psi } (4700 \sqrt{f_c'} \text{ Mpa})$$

Atau $E_c = 0,043 w^{1,5} \sqrt{f_c'} (\text{Mpa})$, dari persamaan (2.2b)

Untuk beton mutu tinggi:

$$E_c (\text{psi}) = [40.000 \sqrt{f_c'} + 10^6] \left[\frac{W_c}{145} \right]^{1,5}, \text{ dari persamaan (2.3a)}$$

di mana f_c' dalam psi dan W_c dalam lb/ft^3 , atau

$$E_c (\text{psi}) = [3,32 \sqrt{f_c'} + 6895] \frac{W_c}{2320}^{1,5} \quad (2.3b)$$

di mana f_c' dalam MPa dan W_c dalam kg/m^3 .

Rumus umum untuk menghitung kuat tekan sebagai fungsi dari waktu adalah

$$f_{ci}' = \frac{t}{\alpha + \beta t} f_c' \quad \text{dari persamaan 2.4a, halaman 18}$$

di mana f_c' = kuat tekan 28 hari

t = waktu (hari)

α = faktor yang bergantung pada tipe semen dan kondisi perawatan

= 4,00 untuk semen tipe I yang dirawat basah dan 2,30 untuk semen tipe III yang dirawat basah

= 1,00 untuk semen tipe I yang dirawat uap dan 2,30 untuk semen tipe III yang dirawat uap

β = faktor yang bergantung pada parameter-parameter yang sama dengan nilai masing – masing 0,85; 0,92; 0,95 dan 0,98.

Dengan demikian, untuk semen tipe I yang dirawat basah,

$$f_{ci}' = \frac{t}{4,00 + 0,85t} f_c' \quad \text{dari persamaan 2.4b, halaman 18}$$

Modulus beton efektif E_c' adalah

$$E_c' = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan elastis} + \text{regangan rangkakan}} \quad \text{dari persamaan 2.5, halaman. 18}$$

dan modulus efektif ultimit adalah

$$E_{cn} = \frac{E_c}{1 + \gamma_t} \quad \text{dari persamaan 2.6a halaman 18}$$

di mana γ_t adalah rasio rangkakan yang didefinisikan sebagai

$$\gamma_t = \frac{\text{regangan rangkakan ultimit}}{\text{regangan elastis}}$$

Rasio rangkakan γ_t mempunyai limit atas dan bawah untuk beton kualitas prategang sebagai berikut:

$$\left[\quad \right]$$

Atas : $\gamma_t = 1,75 + 2,25 \frac{100-H}{65}$ dari persamaan 2.6b halaman 19

Bawah : $\gamma_t = 0,75 + 0,75 \left(\frac{100-H}{50} \right)$ dari persamaan 2.6c halaman 19

Di mana H = kelembaban dalam persen = 70%

b. Kuat Tarik

Kuat tarik beton relative kecil. Pendekatan yang baik untuk kuat tarik f_{ct} adalah $0,10 f_c' < f_{ct} < 0,20 f_c'$

c. Kuat Geser

Nilai kuat geser yang dilaporkan dalam literature, yang bervariasi dari 20 persen kuat tekan untuk untuk pembenanan normal hingga persentase yang sangat besar (sampai 85 persen) dari kuat tekan pada kasus-kasus di mana geser langsung terjadi bersamaan dengan tekan.

Kuat geser = 20 % f_c'

3.3 Analisa Penampang PC. Box Girder berlubang

PC. Box Girder pada bentang 35 meter sebanyak 2 bentang typical, dan bentang 55 m, satu bentang. Bagian penampang PC. Box Girder yang digunakan Fly over jamin giting, adalah terdiri dari web miring, web vertikal, plat atas, plat bawah, plat sayap atas, stiffiner /pengaku, blister, diaphragma. Untuk menghitung / menganalisa adalah berdasar rumus matematik.

a. Luas penampang

Rumus yang dipakai dalam menghitung penampang berikut :

1. Web miring (web 1 dan 4, bagian samping terluar)

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas jajaran genjang;

$$\text{Luas (area) } = \frac{1}{2} (\text{lebar}) \times \sqrt{l'^2 + t^2}$$

Luas rata-rata = akumulasi luas (area) / jumlah cross section

$$\text{Di mana } l' = \frac{\text{tinggi} \times 1}{3,5}$$

3,5:1 = perbandingan kemiringan sisi web 1&4, maka segitiga sebanding

$$1:3,5 = l': \text{tinggi (t)}$$

2. Web vertikal (web 2 dan 3, bagian dalam)

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas empat persegi ;

$$\text{Luas (area) } = \text{lebar} \times \text{tinggi}$$

Luas rata-rata = jumlah luas (area) / jumlah cross section

3. Plat atas

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas empat persegi;

$$\text{Luas (area) } = \text{lebar} \times \text{tinggi}$$

Luas rata-rata = jumlah luas (area) / jumlah cross section

4. Plat bawah

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas trapezium;

$$\text{Luas (area) } = \frac{1}{2} (\text{lebar sisi bawah} + \text{atas}) \times \text{tinggi}$$

Luas rata-rata = jumlah luas (area) / jumlah cross section

5. Plat sayap atas

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas trapezium;

$$\text{Luas (area) } = \text{lebar} \times \frac{1}{2} (\text{tinggi } h_1 + h_2)$$

Luas rata-rata = jumlah luas (area) / jumlah cross section

6. Stiffener/pengaku

Luas bangun dapat dihitung dengan rumus luas segitiga;

$$\text{Luas (area) } = \text{lebar} \times \frac{1}{2} (\text{tinggi } h_1 + h_2)$$

Luas rata-rata = jumlah luas (area) / jumlah cross section

7. Beton yang menonjol (blister)

Luas penampang bangun dapat dihitung dengan rumus luas trapezium ;

Luas penampang (area)= (tinggi h1 +h2)/2 x lebar x jumlah

8. Diaphragma

Luas penampang dihitung dengan luas empatpersegi:

Luas (area) = tebal x tinggi

b. Volume

Rumus yang dipakai dalam menghitung volume berikut :

1. Box girder (plat, sayap, web, stiffiner/pengaku)

Volume = luas penampang rerata x panjang

2. Beton blister

Volume blister = luas penampang x panjang + luas penampang x ½ panjang x jumlah.

3. Diaphragma

Volume diaphragm = luas penampang x ½ (panjang P1 +P2) x jumlah

c. Jarak sumbu titik berat

Jarak titik berat arah Y dihitung dari bawah penampang menurut bentuk trapezium dengan rumus:

$$Y_b = \frac{a+2b}{a+b} \left(\frac{h}{3}\right)$$

$$Y_a = \frac{2a+b}{a+b} \left(\frac{h}{3}\right) \dots\dots\dots \text{sumber : buku teknik sipil, Nova, halaman 115}$$

Jarak titik berat arah Y dihitung dari bawah penampang menurut bentuk persegi empat dengan rumus:

$$Y_b = \frac{h}{2}$$

$$Y_a = \frac{h}{2}$$

Jarak titik berat arah Y dihitung dari bawah penampang menurut bentuk segitiga dengan rumus:

$$Y_b = (1/3)h$$

$$Y_a = (2/3)h \quad \text{sumber : buku teknik sipil, Nova, halaman 114}$$

d. Momen Inersia (*I*)

Inersia awal dapat dihitung berdasarkan bentuk trapezium (plat bawah dan sayap):

$$\text{Inersia (I)} = \frac{a^2 + 4ab + b^2}{36(a+b)} \quad \text{sumber : buku teknik sipil, Nova}$$

Inersia awal dapat dihitung berdasarkan bentuk empat persegi (web dan plat atas):

$$\text{Inersia (I)} = \frac{bh^3}{12}$$

Inersia bentuk segitiga (stiffener / pengaku):

$$\text{Inersia (I)} = \frac{h^3b}{36}$$

Inersia arah X, I_x untuk bangun seperti tampang haruslah dijumlahkan dengan inersia tambahan;

$$\text{Inersia arah X (I}_x) = I + (\text{luas} \cdot d^2)$$

Di mana: d = tinggi efektif tekan ekstrim ($Y - Y_b$)

e. Momen lawan (*W*)

Besarnya momen perlawanan dapat dihitung dengan membagikan Inersia arah X (I_x) dengan jarak sumbu titik berat, secara matematis dapat dituliskan:

$$W_a = I_x / Y_a$$

$$W_b = I_x / Y_b$$

3.4 Pembebanan Berdasarkan RSNI T- 02-2005

Beban-beban yang bekerja pada desain struktur PC. Box.Girder pada proyek Flyover Jamin Ginting adalah:

- Beban mati tetap
- Beban mati tambahan
- Beban hidup

3.4.1 Beban mati tetap dan beban mati tambahan (dead load)

Yang termasuk beban mati tetap adalah berat sendiri box girder, diaphragma, beton handrail. Komponen beban mati tambahan adalah aspal. Besarnya beban tergantung berat jenis komponen-komponen tersebut. Penentuan berat jenis pada komponen sebagai berikut:

1. Berat jenis beton PC. Box. Girder = $2,5 \text{ ton/m}^3$ (γ_{PB})
2. Berat jenis beton blister = $2,5 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{blist})
3. Berat jenis beton stiffener = $2,4 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{stif})
4. Berat jenis beton diaphragma = $2,4 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{diap})
5. Berat jenis beton handrail = $2,4 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{bh})
6. Berat jenis beton kerb median = $2,2 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{bkerb})
7. Berat jenis paving blok median = $2,2 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{pav})
8. Berat jenis pasir median = $1,9 \text{ ton/ m}^3$ (γ_{pasir})
9. Berat jenis aspal = $2,2 \text{ ton/m}^3$ (γ_{asp})

Rumus perhitungan beban q:

- Beban PC. Box. Girder $q_1 = \text{Luas rata-rata} * (\gamma_{PB}) = \text{t/m (k N/m)}$

- Beban beton blister $q_{1a} = (\text{luas rerata} * \text{tinggi rata-rata} * \text{panjang} * n) * \gamma_{\text{blis}} / \text{bentang} = t/m (k N/m)$
- Beban beton stiffener $q_{1b} = (\text{luas} * n) * (\gamma_{\text{stif}})$
- Beban beton diaphragma $q_2 = (\text{volume} * \gamma_{\text{diap}} * n_{\text{diap}}) / \text{bentang}$
- Beban beton handrail $q_3 = \text{Luas} * n * (\gamma_{\text{bh}})$
- Beban beton kerb $q_4 = \text{Luas} * n * (\gamma_{\text{kerb}})$
- Beban beton paving blok $q_{4a} = \text{Luas} * \text{panjang} * (\gamma_{\text{pav}})$
- Beban beton pasir $q_{4b} = \text{Luas} * \text{panjang} * (\gamma_{\text{pasir}})$
- Beban aspal $q_5 = t_{\text{asp}} * s * (\gamma_{\text{asp}})$

Faktor beban (K) untuk berat sendiri beton cor di tempat biasa dikalikan dengan 1,3 dan faktor beban untuk beban mati tambahan dipilih dengan mengalikan 2,0.

3.4.2 Beban hidup (live load)

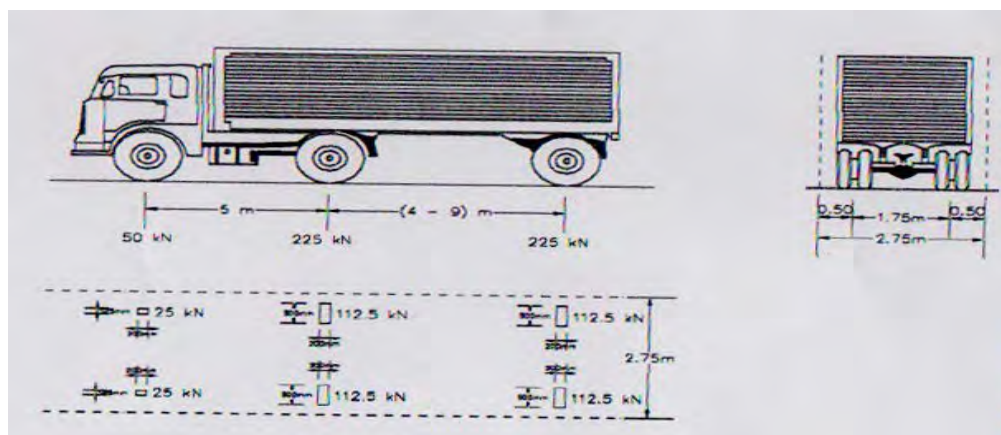
3.4.2.1 Pembebanan truk (T)

Beban truk "T" adalah 500 kN,

Item	unit	P1	P2	P3
Load	k N	225	225	50

Berat masing-masing as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai.

3.4.2.2 Beban lajur (D)



Beban garis / line load

a. Faktor beban dinamis (FBD) / dynamic load allowance (DLA)

- $DLA = 1 + 0,4 \quad = 1,4$ bentang /span ≤ 50 m

- $DLA = 1 + (0,0025 \cdot \text{bentang} + 0,175)$ $50 \text{ m} < \text{span} < 90 \text{ m}$

b. Beban garis tepi (BGT)/ Knife edge load (KEL)

- $KEL = 49 \text{ kN/m}^2$

c. Distribution factor (DF)

- $DF = 1,00$

d. Beban terbagi rata (BTR) / Distribution load (q)

$q = 9,00 \text{ kN/m}^2$

di mana: $q = 9 \text{ kN/m}^2$, jika bentang /span ≤ 30 m

$q = 9 \times (0,5 + 15/\text{bentang}) \text{ kN/m}^2$, jika bentang /span > 30 m

e. Live load

- Distribution load, $q_{udl} = DF \times q \times s = \text{kN/m}^2$

- $KEL, P_{KEL} = DF \times DLA \times KEL \times s = \text{kN}$

Di mana s adalah jarak antara dinding/web box girder, besar s pada beton cor monolit diambil jarak bersih, untuk beton terpisah, besar s adalah jarak as ke as balok. Faktor beban untuk beban hidup (LL) dikalikan dengan 1,8

3.4.2.3 Beban gempa (T^*_{EQ})

Berdasarkan peta zona gempa Indonesia, bahwa daerah proyek Flyover Jamin Ginting Medan, berada dalam zona 3. Beban rencana gempa minimum diperoleh dari rumus berikut:

$$T^*_{EQ} = K_h I W_T$$

Di mana:

$$K_h = C.S$$

Dengan pengertian:

T^*_{EQ} = gaya geser dasar total dalam arah yang ditinjau (k N)

K_h = koefisien beban gempa horisontal

C = koefisien geser dasar untuk daerah, waktu dan kondisi setempat yang sesuai

I = Faktor kepentingan

S = Faktor tipe bangunan

W_T = Berat total nominal bangunan yang mempengaruhi percepatan gempa, diambil sebagai beban mati ditambah beban mati tambahan (kN)

3.5 Analisa Momen

3.5.1 Momen lentur

Beban mati / dead load (DL)

a. akibat beban mati sendiri box / dead load di tengah bentang M_{ms1} sebesar:

$$M_{ms1} = 1/24 * q * L^2$$

b. akibat beban mati diaphragma di tengah bentang M_{ms2}

$$M_{ms2} = 1/24 * q * L^2$$

5. akibat beban mati tambahan Handrail di tengah bentang M_{ms3}

$$M_{ms3} = 1/24 * q * L^2$$

d. akibat beban mati tambahan asfalt di tengah bentang M_{ms4}

$$M_{ms4} = 1/24 * q * L^2$$

Beban hidup / live load (LL)

e. Distribution load di tengah bentang M_{ms5}

$$M_{ms5} = 1/24 * q * L^2$$

d. beban garis / Knife edge load (KEL) di tengah bentang M_{ms6}

$$M_{ms6} = 1/24 * q * L^2$$

Ultimate total = 1,3 *(Box girder + topping + diaphragma)+1,3 *(tembok sandaran/barrier) +2 *aspalt + 1,8 LL

3.5.2 Momen retak

Momen retak disebut juga momen crack M_{cr} , momen crack ini disebabkan momen lentur terus meningkat dengan bekerjanya secara penuh beban mati tambahan dan beban hidup. Dengan menghitung besarnya momen retak M_{cr} adalah untuk menentukan kekuatan cadangan dan batas kelebihan beban yang dimiliki penampang.

Rumus :

$$M_{cr} = f_r S_b + Pe \left(e + \frac{r^2}{c_b} \right)$$

Di mana modulus raptur $f_r = 7,5 \sqrt{f'_{ci}}$

3.6. Kabel Prategang

3.6.1 Penentuan posisi kabel strand PC. Box. Girder berlubang

Langkah – langkah penentuan tendon bentuk draped (parabolik) pada PC.

Box girder :

1. Penentuan modulus penampang minimum yang dibutuhkan:

S^t = modulus penampang atas beton

S_b = modulus penampang bawah beton

Jika:

$$f_{ci}' = 0,75 f_c$$

f_{ci} = tegangan tekan izin maksimum di beton segera sesudah transfer dan sebelum terjadi kehilangan

$$= 0,60 f_{ci}'$$

f_{ti} = tegangan tarik izin maksimum di beton segera sesudah transfer dan sebelum terjadi kehilangan

$$= 3\sqrt{f_c}' \text{ (nilai ini dapat diperbesar menjadi } 6\sqrt{f_c}' \text{ di tumpuan komponen struktur yang ditumpu sederhana)}$$

f_c = tegangan tekan izin maksimum di beton sesudah kehilangan pada taraf beban kerja

$$= 0,45 f_c' \text{ atau } 0,60 f_c' \text{ apabila diperkenankan oleh standard}$$

f_t = tegangan tarik izin maksimum di beton sesudah semua kehilangan pada taraf beban kerja

$$= 6\sqrt{f_c}' \text{ (pada system satu arah nilai ini dapat diperbesar menjadi } 12\sqrt{f_c}' \text{ jika persyaratan defleksi jangka panjang dipenuhi)}$$

Maka tegangan serat ekstrim actual di beton tidak dapat melebihi nilai-nilai yang tercantum di atas. (sumber: Edward G. Nawy, jilid 1, hal.108)

2. Penentuan tegangan pada saat transfer;

Rumus : (sumber: Edward G. Nawy, jilid 1, hal.109)

$$f^a = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{e c_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S_t} \leq f_{ti} \text{ (3.8.1a)}$$

$$f^b = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e c_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ci} \text{ (3.8.1b)}$$

3. Penentuan tegangan efektif sesudah kehilangan;

Rumus : (sumber: Edward G. Nawy, jilid 1, hal.110)

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \leq f_t \dots\dots\dots(3.8.2a)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_c \dots\dots\dots(3.8.2b)$$

4. Penentuan tegangan akhir pada kondisi beban kerja;

Rumus : (sumber: Edward G. Nawy, jilid 1, hal.110)

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t} \leq f_c \dots\dots\dots(3.8.3a)$$

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \leq f_t \dots\dots\dots(3.8.3b)$$

di mana $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$

P_i = prategang awal

P_e = prategang efektif sesudah kehilangan

t menunjukkan serat atas dan b menunjukkan serat bawah

e = eksentrisitas tendon dari pusat berat penampang beton, ec_g

r^2 = kuadrat dari jari-jari girasi

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c}$$

S^t = modulus penampang atas beton

S_b = modulus penampang bawah beton

Pada tahap ini, perubahan tegangan beton akibat dekomposisi adalah

$$f_{decomp} = \frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) \dots\dots\dots(3.8.3c)$$

5. Penentuan eksentrisitas tendon bervariasi dengan tendon bentuk draped, eksentrisitas maksimum biasanya terjadi di penampang tengah bentang

yang menentukan untuk kasus balok bertumpuan sederhana. Dengan mengamsusikan bahwa gaya prategang efektif adalah;

$$P_e = \gamma P_i$$

di mana γ adalah rasio prategang residual, $\gamma = 100-18 = 82\% = 0,82$

maka kehilangan prategang adalah

$$P_i - P_e = (1-\gamma)P_i \dots\dots\dots(a)$$

Jika tegangan di serat beton aktual sama dengan tegangan izin maksimum, maka perubahan tegangan ini sesudah kehilangan, dari persamaan 3.8.2a dan b, dapat dinyatakan dengan

$$\Delta f^t = (1-\gamma) \left(f_{ti} + \frac{M_D}{S_t} \right) \dots\dots\dots(b)$$

$$\Delta f_b = (1-\gamma) \left(f_{ci} + \frac{M_D}{S_b} \right) \dots\dots\dots(c)$$

Pada saat momen akibat beban mati tambahan M_{SD} dan momen akibat beban hidup M_L telah bekerja, tegangan netto di serat atas adalah

$$f_n^t = f_{ti} - \Delta f^t - f_c$$

atau

$$f_n^t = \gamma f_{ti} - (1-\gamma) \frac{M_D}{S_t} - f_c \dots\dots\dots (d)$$

Tegangan netto di serat bawah adalah

$$f_{bn} = f_t - f_{ci} - \Delta f_b$$

atau

$$f_{bn} = f_t - \gamma f_{ci} - (1-\gamma) \frac{M_D}{S_b}$$

$$\dots\dots\dots(e)$$

Dari persamaan (d) dan (e), penampang yang telah dipilih harus mempunyai modulus penampang

$$S^t \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c} \dots\dots\dots(3.8.4a)$$

dan

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{f_t - \gamma f_{ci}}$$

.....(3.8.4b)

Eksentrisitas tendon prategang yang dibutuhkan di penampang kritis, seperti di penampang tengah bentang, adalah

$$e_c = (f_{ti} - \bar{f}_{ci}) \frac{S^t}{P_i} + \frac{M_D}{P_i} \dots\dots\dots(3.8.4c)$$

di mana \bar{f}_{ci} adalah tegangan beton pada saat transfer pada level pusat berat (cgc) penampang beton dan

$$P_i = \bar{f}_{ci} A_c$$

jadi

$$\bar{f}_{ci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h} (f_{ti} - f_{ci}) \dots\dots\dots(3.8.4d)$$

6. Penentuan luas tendon dan banyak tendon yang diperlukan di penampang yang mengalami momen maksimum di tengah bentang adalah:

Dengan rumus; sumber: Edward G. Nawy, jilid 1, hal.127

$$\text{Luas tendon yang dibutuhkan } A_p = \frac{P_i}{f_{pi}} = (\text{cm}^2)$$

Di mana $f_{pi} = 0,70 \times f_{pu}$

$$f_{pi} = 0,70 \times 270.000 \text{ psi} = 189.000 \text{ psi}$$

$$f_{pu} = 270.000 \text{ psi} (11228 \text{ MPa})$$

$$\text{Banyak tendon} = \frac{A_p}{\text{luas satu strand}}$$

Setelah banyak tendon sudah dapat, kemudian cek tegangan serat ekstrim beton.

Dari persamaan 3.8.2a

$$f^t = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \leq f_{ti}$$

jika $f^t \leq f_{ti}$ O.K.

Dari persamaan 3.8.2b

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ci}$$

jika $f_b \leq f_{ci}$ O.K.

Selanjutnya analisis tegangan pada kondisi beban kerja. Dari persamaan 3.8.3a

$$f^t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S^t} \leq f_c$$

di mana momen total $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$

jika $f^t \leq f_c$ OK, tapi jika $f^t > f_c$ maka tinggi penampang diperbesar, atau mutu beton dipilih kekuatan lebih tinggi lagi dengan menggunakan f_c'

$$f_c = 0,45 \times f_c'$$

Dari persamaan 3.8.3b

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{ec_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \leq f_t \quad \text{jika } f_b \leq f_t \quad \text{O.K.}$$

Selanjutnya cek tegangan penampang tumpuan.

Tegangan – tegangan izin: $f_{ci}' = 0,75 \times f_c'$

$$f_{ci} = 0,60 \times f_{ci}'$$

$$f_{ti} = 3 \sqrt{f_{ci}'}, \text{ untuk tengah bentang}$$

$$f_{ci} = 6 \sqrt{f_{ci}'}, \text{ untuk tumpuan}$$

$$f_c = 0,45 f_c'$$

$$f_{ti} = 6 \sqrt{f_c'}$$

$$f_{i2} = 12 \sqrt{f'_c}$$

(a) Pada saat transfer. Tegangan tekan di penampang tumpuan.

$$f_b = - \frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_b}{r^2} \right) + 0$$

(b) Pada kondisi beban kerja

$$f^t = - \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2} \right) - 0 = \quad (T), \text{ jika } < f_{i2} \text{ psi, O.K.}$$

$$f_b = - \frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{ec_b}{r^2} \right) + 0 = \quad (C), \text{ jika } < f_c \text{ psi, O.K.}$$

7. Penentuan selubung untuk meletakkan tendon.

Tegangan tendon di serat beton ekstrim pada kondisi beban kerja tidak dapat melebihi nilai izin maksimumnya. Dengan demikian, zona yang membatasi di penampang beton perlu ditetapkan, yaitu selubung (envelope) yang di dalamnya gaya prategang dapat bekerja tanpa menyebabkan terjadinya tarik di serat beton ekstrim. Dari persamaan didapatkan

$$f^t = 0 = - \frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2} \right)$$

untuk bagian gaya prategang saja, sehingga $e = r^2/c_t$.

Dengan demikian titik kern ditentukan:

Titik kern bawah adalah dengan rumus;

$$k_b = \frac{r^2}{c_t} \dots\dots\dots 3.8.5a$$

jika $f_b = 0$, didapatkan $-e = r^2/c_b$, tanda negatif menunjukkan pengukuran ke arah bawah dari sumbu netral, karena eksentrisitas positif adalah ke arah bawah.

Dengan demikian, titik kern atas adalah dengan rumus;

$$k_t = \frac{r^2}{c_b} \dots\dots\dots 3.8.5b$$

Dari penentuan titik – titik kern atas dan bawah, jelaslah bahwa

- (a) Jika gaya prategang bekerja di bawah titik kern bawah, tegangan tarik terjadi di serat ekstrim atas dari penampang beton.
- (b) Jika gaya prategang bekerja di atas titik kern atas, tegangan tarik terjadi di serat ekstrim bawah penampang beton.

8. Penentuan selubung eksentrisitas yang membatasi.

Eksentrisitas tendon didesain di sepanjang bentang, jika tarik tidak dikehendaki di sepanjang bentang girder dengan tendon bentuk draped (parabolik), maka eksentrisitasnya harus ditentukan di penampang –penampang berikut di sepanjang bentang. Jika M_D adalah momen akibat beban mati dan M_T adalah momen total akibat semua beban transversal, maka lengan dari kopel antara garis tekan pusat (garis C) dan pusat dari garis tendon prategang (garis cgs) akibat M_D dan M_T masing-masing adalah a_{min} dan a_{max} , seperti terlihat dalam gambar 3.1.

(a) Selubung cgs bawah. Lengan minimum dari kopel tendon adalah

$$a_{min} = \frac{M_D}{P_i} \dots\dots\dots(3.8.6a)$$

Persamaan ini mendefinisikan jarak maksimum di bawah kern bawah di mana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di bawah garis kern bawah, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim atas. Dengan demikian, eksentrisitas bawah yang membatasi adalah

$$e_b = (a_{min} + k_b) \dots\dots\dots(3.8.6b)$$

(b) Selubung cgs atas. Lengan minimum dari kopel tendon adalah

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_e} \dots\dots\dots(3.8.6c)$$

Persamaan ini mendefinisikan jarak minimum di bawah kern atas di mana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di atas kern atas, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim bawah. Dengan demikian, eksentrisitas atas yang membatasi adalah

$$e_t = (a_{maks} + k_t) \dots \dots \dots (3.8.6d)$$

dalam hal ini, garis cgs diperkenankan terletak sedikit di luar dua batas selubung cgs yang didefinisikan dalam persamaan 3.8.6a dan c. Apabila eksentrisitas tambahan e_b' dan e_t' ditambahkan pada selubung garis cgs yang menghasilkan tegangan tarik terbatas di serat beton atas dan bawah, maka tegangan tambahan di atas $f^{(t)}$ dan $f^{(b)}$ adalah

$$f^{(t)} = \frac{P_i e_b' c_t}{I_c} \dots \dots \dots (3.8.7a)$$

dan

$$f^{(b)} = \frac{P_i e_t' c_b}{I_c} \dots \dots \dots (3.8.7b)$$

di mana t dan b masing-masing menunjukkan serat atas dan bawah. Dari persamaan 3.8.5, eksentrisitas tambahan yang akan ditambahkan pada persamaan 3.8.6b dan d adalah

$$e_b' = \frac{f^{(t)} A_c k_b}{P_i} \dots \dots \dots (3.8.8a)$$

dan

$$e_t' = \frac{f^{(b)} A_c k_t}{P_e} \dots \dots \dots (3.8.8b)$$

9. Penentuan selubung tendon prategang.

Karena momen lentur diakibatkan oleh beban terbagi rata, maka bentuk

diagram momen lentur adalah parabolik dengan momen nol terletak di kedua ujung.

Dengan demikian, momen seperempat bentang adalah

$$M_D = 0,75 \times M_D$$

$$M_T = 0,75 \times M_T$$

Perhitungan untuk selubung bawah

(i) Tengah bentang

$$a_{\min} = \frac{M_D}{P_i} = \text{mm}$$

sehingga

$$e_1 = k_b + a_{\min} = \text{mm}$$

(ii) Seperempat bentang

$$a_{\min} = \frac{0,75 \times M_D}{P_i} = \text{mm}$$

sehingga

$$e_2 = k_b + a_{\min} = \text{mm}$$

(iii) Tumpuan

$$a_{\min} = 0$$

sehingga

$$e_3 = k_b + 0 = \text{mm}$$

a. Perhitungan untuk selubung atas

(i) Tengah bentang

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} = \text{mm}$$

sehingga

$$e_1 = a_{\max} - k_t = \text{ mm}$$

selimut minimum bersih = 3,0 in.

syarat e_1 tidak dapat melebihi c_b agar tendon terletak di dalam penampang

(ii) Seperempat bentang

$$a_{maks} = \frac{0,75 \times M_T}{P_e} = \text{ mm}$$

sehingga

$$e_2 = a_{maks} - k_t = \text{ mm}$$

(iii) Tumpuan

$$a_{maks} = 0$$

sehingga, $e_3 = 0 - k_t = (- \text{ mm})$ (+ mm di atas garis cgc)

Untuk tujuan praktis asumsikan bahwa tegangan tarik serat maksimum pada kondisi beban kerja yang dibutuhkan untuk membuat selubung cgs tidak melebihi $f_t = 6 \sqrt{f'_c}$. Dari persamaan 3.8.8a, eksentrisitas tambahan yang ditambahkan pada selubung cgs agar memungkinkan terjadinya tarik terbatas pada serat atas adalah

$$e'_b = \frac{f^{(t)} A_c k_b}{P_i} = \text{ mm}$$

Dengan cara sama, dari persamaan 3.8.8b, eksentrisitas tambahan yang ditambahkan pada selubung cgs agar memungkinkan terjadinya tarik terbatas di serat bawah adalah

$$e'_t = \frac{f^{(b)} A_c k_t}{P_e} = \text{ mm}$$

Selanjutnya dibuat rangkuman dari hasil perhitungan rumus di atas. dibuat hasilnya pada bab IV

10. Penentuan jumlah baris tendon.

(a) Solusi dengan menggunakan metode tegangan elastis linier

Menetapkan konfigurasi tendon yang menghasilkan eksentrisitas $e_e = \text{cm}$, dan $c_b = \dots$ sehingga jarak dari serat bawah balok $= c_b - e_e$

Untuk jarak pusat berat banyak tendon, sebesar $c_b - e_e$ dari serat bawah balok, dengan mencoba susunan baris sebagai berikut:

Baris pertama = Jumlah tendon pada jarak

Baris kedua = Jumlah tendon pada jarak

Baris ketiga = Jumlah tendon pada jarak

Dan seterusnya

Syarat jarak pusat berat tendon

$$= \frac{\text{tendon pertama} \times \text{jarak} + \text{tendon kedua} \times \text{jarak} + \text{tendon ketiga} \times \text{jarak}}{\text{banyak tendon}} = c_b - e_e \quad . \text{ oke.}$$

sumber: Edward G. Nawy, jilid 1

3.6.2 Kehilangan Prategang

Langkah demi langkah perhitungan semua kehilangan prategang yang bergantung pada waktu pada girder pascatarik

Solusi:

(a) Kehilangan karena dudukan angker

$$\Delta_A = 1''/4 = 0,25''$$

Kehilangan akibat gelincir angker adalah

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{PS}$$

(b) Perpendekan elastis.

Jika semua dongkrak ditarik secara simultan, maka perpendekan elastic akan berpresipitasi selama pendongkrakan. Dengan demikian, tidak terjadi kehilangan tegangan akibat perpendekan elastic di tendon. Jadi, $\Delta f_{pES} = 0$.

Akan tetapi jika n adalah banyaknya tendon atau pasangan tendon yang ditarik secara sekuensial, maka $\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j$

(c) Kehilangan karena gesekan. Diasumsikan bahwa tendon parabolic mendekati busur lingkaran. Jadi dari persamaan 2.25

$$\alpha = \frac{8y}{x} = \text{radian}$$

dari tabel 2.8, nilai $K = \dots$, dan $\mu = \dots$

jadi dari persamaan 2.35, $f_{pi} = \dots$ (MPa)

kehilangan tegangan karena gesekan dari persamaan adalah

$$\Delta f_{pF} = f_{pi} (\mu\alpha + KL) = \dots \text{ (MPa)}$$

Tegangan yang tersisa di baja prategang sesudah semua kehilangan awal adalah

$$f_{pi} = f_{pi} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pES} - \Delta f_{pF} = \dots \text{ (MPa)}$$

jadi, gaya prategang netto adalah

$$P_i = f_{pi} \times A_{ps} = \dots \text{ (N)}$$

Tahap I: *Tegangan Pada Saat Transfer*

(a) kehilangan karena dudukan angker

$$\text{Kehilangan } \Delta f_{pA} = \dots$$

$$\text{Tegangan netto } f_{pi} = \dots$$

(b) kehilangan karena Relaksasi

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right)$$

$$\cong \dots \text{ (MPa)}$$

Di mana $t_1 = 18$ jam

(c) kehilangan karena Rangkak

$$\Delta f_{pCR} = 0$$

(d) kehilangan karena susut

$$\Delta f_{pSH} = 0$$

Jadi tegangan tendon f_{pi} di akhir tahap I adalah

$$f_{pi} - \Delta f_{pR} = \text{psi (MPa)}$$

Tahap II: *Transfer Sampai Penempatan Topping sesudah 30 Hari*

(a) kehilangan karena rangkak

$$P_i = f_{pi} \text{ akhir} \times A_{ps} = N$$

$$\bar{f}_{CS} = \frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D e}{I_c} = \text{MPa}$$

Jadi, kehilangan karena rangkak adalah

$$\Delta f_{pCR} = n K_{CR} (\bar{f}_{CS} - \bar{f}_{csd})$$

(b) Kehilangan karena susut. Untuk pascatarik $K_{SH} = 0,58$ pada 30 hari, untuk pratarik nilai $K_{SH} = 1,0$

$$\Delta f_{pSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{PS} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) \times 0,58$$

$$= 8,2 \times 10^{-6} \times 1,0 \times E_{PS} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) \times 0,58$$

(c) Kehilangan karena relaksasi baja pada 30 hari

$$f_{ps} = f_{pi} \text{ netto} - \Delta f_{pR}$$

sehingga kehilangan karena relaksasi menjadi

$$\Delta f_{pR} = f_{ps} \left(\frac{\log 720 - \log 18}{10} \right) \left(\frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0,55 \right)$$

Tahap II: Kehilangan total

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pCH} + \Delta f_{pR}$$

jadi, tegangan strand di akhir tahap II adalah

$$f_{pe} = f_{ps} - \Delta f_{pT} + \Delta f_{SD}$$

Tahap III: Di akhir 2 tahun

$$f_{pe} = \text{psi (MPa)}$$

$$t_1 = 720 \text{ jam}$$

$$t_2 = 17520 \text{ jam}$$

kehilangan tegangan karena relaksasi baja adalah

$$\Delta f_{pR} = f_{pe} \left(\frac{\log 17520 - \log 720}{10} \right) \left(\frac{f_{pe}}{f_{py}} - 0,55 \right)$$

Tegangan strand f_{pe} di akhir tahap III kira-kira

$$f_{pe} \text{ tahap II} - \Delta f_{pR} \text{ tahap III}$$

Contoh rangkuman tegangan

Level tegangan pada berbagai tahap	Tegangan baja, (psi MPa)	Persen
Sesudah penarikan ($0,70 f_{pu}$)		100
Kehilangan karena perpendekan elastis		
Kehilangan karena angker	-	
Kehilangan karena gesekan	-	
Kehilangan karena rangkai	-	
Kehilangan karena susut	-	
Kehilangan karena relaksasi	-	
Pertambahan karena topping		

Tegangan netto akhir f_{pe}
Persentase kehilangan total

sumber: Edward G. Nawy, jilid 1

3.6.2.1 Kontrol Besar Momen akibat prategang sesudah semua kehilangan

Momen gaya prategang sesudah semua kehilangan adalah:

Gaya prategang, $P_e = A_{ps} \times f_{pe}$

Di mana momen primer di tumpuan P5 adalah:

$$M_{P5} = P_e \times e_{P5}$$

Momen primer di tengah bentang antara P5-P6 adalah:

$$M_{P5-P6} = P_e \times e_{P5-P6}$$

3.6.3. Gaya Prategang efektif

Prategang efektif = gaya prategang inisial (awal) – kehilangan prategang

3.7. Analisa Tegangan

Gaya prategang yang diberikan pada kabel strand merupakan gaya prategang initial (jacking force disingkat JF) yang besarnya belum dikurangi oleh besar kehilangan gaya prategang akibat kehilangan jangka pendek dan jangka panjang. Dalam perhitungan, besarnya gaya prategang initial (jacking force) adalah $f_{pi} = 0,70 f_{pu} = 0,70 \times 270.000 \text{ psi} = 189.000 \text{ psi}$ atau $0,70 \times 1862 \text{ Mpa} = 1303,4 \text{ Mpa}$

3.7.1. Tegangan saat awal

Di tengah bentang ;

Momen akibat beban mati berat sendiri adalah

$$M_D = \frac{wl^2}{24}$$

Tegangan di serat atas (f^t)

$$f^t = \frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S^t}$$

Tegangan di serat bawah (f_b)

$$f_b = \frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{ec_b}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S_b}$$

3.7.2. Tegangan saat servis / saat beban kerja

Di tengah bentang ;

Momen tengah bentang akibat beban mati tambahan dan beban hidup adalah

$$M_{SD} + M_L = \frac{W_{SD} + W_L l^2}{24}$$

Momen total $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$

Tegangan di serat atas (f^t)

$$f^t = \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2} \right) - \frac{M_T}{S^t}$$

Tegangan di serat bawah (f_b)

$$f_b = \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_b}{r^2} \right) - \frac{M_T}{S_b}$$

3.8 Besar Lentutan atau Defleksi

Sebelum penentuan besar lentutan, terlebih dahulu harus diketahui:

Mutu beton initial

$$f_c = \text{MPa}$$

$$f_{ci} = 0,65 \cdot f_c = \text{MPa}$$

modulus elastic beton

$$E_c = 4700 \sqrt{f_{ci}} \text{ (MPa)}$$

$$E_{ci} = 4700 \sqrt{f_{ci}} \text{ (MPa)}$$

Beban layan

$$\text{Beban mati } W_D = q_{DL} = k \text{ N/m}$$

$$\text{Beban hidup } W_L = q_L = k \text{ N/m}$$

a. lendutan awal (initial)

chamber akibat prestress saja $e =$ mm

$$\Delta_{pi} = \frac{-5.P_i.e.L^2}{48.E_{ci}.I} = - \text{ mm (ke atas)}$$

Defleksi akibat berat sendiri

$$\Delta_{bs} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W_D.L^4}{E_c \cdot I} = \text{ mm (ke bawah)}$$

Defleksi jangka panjang oleh PCI multipliers

$$\Delta_1 = 1,85 \cdot \Delta_{bs} + 1,8 \cdot \Delta_{pi}, \Delta_1 = - \text{ mm (ke atas)}$$

b. lendutan akhir

Defleksi akibat beban hidup merata, qLL

$$\Delta_{qL} = \frac{5}{384} \cdot \frac{W_L.L^4}{E_c \cdot I} = \text{ mm (ke bawah)}$$

$$\Delta_{PL} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P_L.L^3}{E_c \cdot I} = \text{ mm (ke bawah)}$$

$$\Delta_L = \Delta_{qL} + \Delta_{PL}$$

$$\text{kontrol defleksi, } \Delta_L < \frac{L}{800} = \text{ mm . OK!}$$

Defleksi jangka panjang total:

$$\Delta_2 = 2,45 \cdot \Delta_{pi} + 2,7 \cdot \Delta_{bs}; \Delta_2 = - \text{ mm (ke atas)}$$

Defleksi total:

$$\Delta_{\text{tot}} = \Delta_2 - \Delta_1 + \Delta_L$$

$$\Delta_{\text{tot}} = \text{mm (ke bawah)}$$

3.9. Penulangan Torsional PC. Box Girder Berlubang

Syarat tendon dan tulangan longitudinal harus diletakkan di dalam sengkang tertutup dan sedikitnya satu tendon atau tulangan longitudinal di setiap pojok sengkang. Diameter batang harus sedikitnya 1/16 dari jarak sengkang. Juga, tulangan torsional tidak boleh melebihi jarak minimum ($b_t + d$) melewati titik yang secara teoritis dibutuhkan untuk torsi, karena retak diagonal torsional timbul dalam bentuk helical melebihi retak yang diakibatkan oleh geser dan lentur.

Rumus metric SI (system international):

Menentukan luas tulangan longitudinal untuk penampang box berlubang sebagai berikut:

Luas tulangan longitudinal (A_l)

$$A_l = \frac{A_t}{S} p_h \left(\frac{f_{yv}}{f_{yl}} \right) \cot^2 \theta$$

$$A_t = \frac{T_n}{2A_0 f_{yv} \cot \theta}$$

$$\text{Banyak tulangan longitudinal} = \frac{A_l}{\text{luas 1 batang}}$$

Di mana: A_l = luas total semua tulangan torsional longitudinal di penampang

A_t = luas satu kaki sengkang

S = jarak sengkang

p_h = keliling as tulangan torsional transversal tertutup yang paling luar

f_{yv} = kuat leleh tulangan torsional transversal tertutup, tidak boleh melebihi 60.000 psi (414 MPa)

f_{yt} = kuat leleh tulangan torsional longitudinal, tidak boleh melebihi 60.000 psi (414 MPa)

θ = sudut diagonal tekan di analogy rangka batang ruang untuk torsi, nilai θ diambil $37,5^\circ$ untuk prategang

Rumus menentukan tulangan geser A_v yang diperlukan per unit jarak dalam potongan transversal. dengan;

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y d}$$

Di mana $V_s = V_n - V_c$ dan

$$V_c = \left(0,6 \lambda \sqrt{f'_c} + \frac{700 V_u d}{M_u} \right) b_w d$$

$$V_c = \leq 1,7 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \geq 5,0 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$\frac{V_u d}{M_u} \leq 1,0$$

$\lambda = 1,0$ untuk beton berbobot normal

= 0,85 untuk beton ringan pasir

= 0,75 untuk beton ringan seluruhnya

Nilai V_n sedikitnya harus sama dengan V_u / ϕ .

Mendapatkan luas sengkang tertutup A_{vt} untuk torsi dan geser, dan desainlah sengkangnya sedemikian hingga

$$A_{vt} = 2A_t + A_v$$

$$\geq \text{terkecil di antara } \frac{50b_w s}{f_{yv}} \text{ atau } \frac{A_{ps} f_{pu}}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_w}}$$

Perpanjangan sengkang sejarak $(b_t + d)$ melebihi nilai teoritisnya tidak diperlukan lagi, di mana b_t = lebar potongan penampang (cross – section) yang memuat

senggang tertutup yang menahan torsi. (referensi : Beton prategang , Edward G. Nawy, jilid 1)

3.10. Penganalisaan Umur Rencana PC. Box. Girder Fly over.

Dicoba umur rencana jembatan fly over ini 100 tahun, karena termasuk jembatan khusus. Untuk ini factor beban ultimit harus diubah dengan menggunakan factor pengali (K^0) dengan aksi tetap dikalikan 1,0, sedangkan untuk aksi transien dikalikan 1,10.

$$\text{Rumus : } M_n = M_{ult} / \phi$$

$$M_{ult} = 1,10 * M_{ult}$$

Control apabila $\phi M_n / M_{ult} = > 1,10$, berarti oke!

Untuk umur rencana 50 tahun , dengan menggunakan factor pengali (K^0) dengan aksi tetap dikalikan 1,0, sedangkan untuk aksi transien dikalikan 1,0 juga.

Sumber: RSNI T-02-2005, halaman 44