

V. PENGONTROLAN LEBAR RETAK SEHUBUNGAN DENGAN ADANYA REDISTRIBUSI MOMEN

1. UMUM.

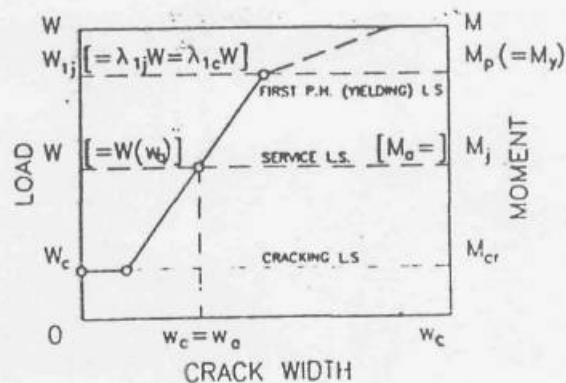
Selama ini desain struktur beton didasarkan pada konsep "*Limit State Design*", dimana struktur dan komponen struktur harus memenuhi persyaratan ultimate limit states (ULS) dan serviceability limit states (SLS) dimana gaya-gaya dalam (momen, gaya geser dan sebagainya) didapatkan dari analisa linier-elastis, dengan atau tanpa redistribusi momen, yang sebenarnya adalah keuntungan potensial bagi daktilitas beton yang harus dipertimbangkan.

Standar struktur terbaru yang mengacu pada "Yield Safety Concept" (λ_{ij}) [20], membatasi redistribusi momen yang boleh dilakukan agar lebar retak yang terjadi tidak melampaui batas maksimumnya. Teori plastis sederhana mengusulkan bahwa redistribusi momen dibatasi oleh ratio antara beban hidup dan beban total $W_L/(W_L + W_D)$

serta faktor keamanan/beban parsial λ_p , λ_i dan ϕ . Juga studi tentang daktilitas lentur pada struktur beton, membuktikan bahwa indeks tulangan w , derajat pratekanan τ , lebar retak yang diijinkan w_a , mempunyai pengaruh terhadap kelakuan pada ULS dan SLS [20]. Oleh karena itu beberapa parameter redistribusi ($x_{ij} = \lambda_{ij} / \lambda_0$ dan $y_{ij} = 1 - x_{ij}$) dipakai untuk mengontrol ULS dan SLS.

2. PARAMETER LEBAR RETAK.

Pendekatan untuk pengontrolan lebar retak yang dihubungkan dengan adanya redistribusi momen dapat diterangkan dengan asumsi sebuah penampang yang diketahui geometri dan materialnya dapat diperkirakan variasi linier yang tipikal dari lebar retak, w_c dengan pembebanan oleh beban W atau momen M , yang bergerak dari mulai retak sampai pada saat sendi plastis terbentuk (leleh) pada penampang kritis j , ($W_{ij} = \lambda_{ij} \cdot W$ dan M_{pj}).



Gambar 5.1. Variasi tipikal dari lebar retak karena beban W atau momen M .

Diasumsikan lebar retak yang diijinkan w_a dicapai ($w_c = w_a$) tepat pada service load W dan λ_{1c} (faktor beban leleh yang membentuk sendi plastis pada penampang j), sehingga :

$$W_{1c} = \lambda_{1c} \cdot W \quad \dots\dots\dots(5-1a)$$

atau $\lambda_{1c} = W_{1c}/W \quad \dots\dots\dots(5-1b)$

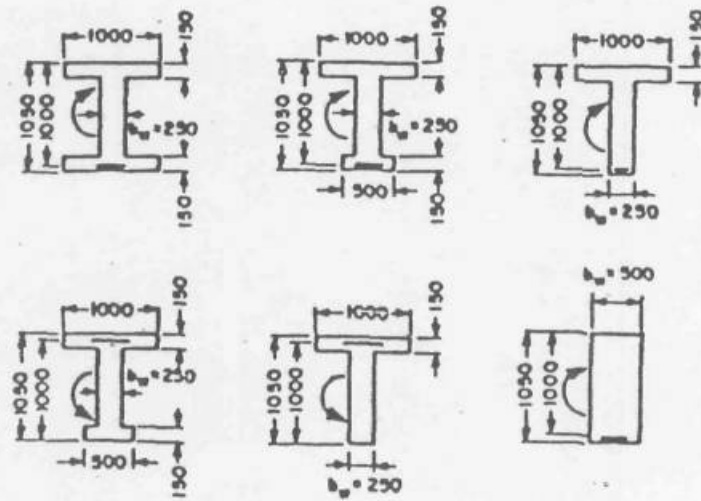
Persyaratan lebar retak $w_c \leq w_a \quad \dots\dots\dots(5-2)$

dicapai bila : $W_{1j} \geq W_{1c} \quad \dots\dots\dots(5-3a)$

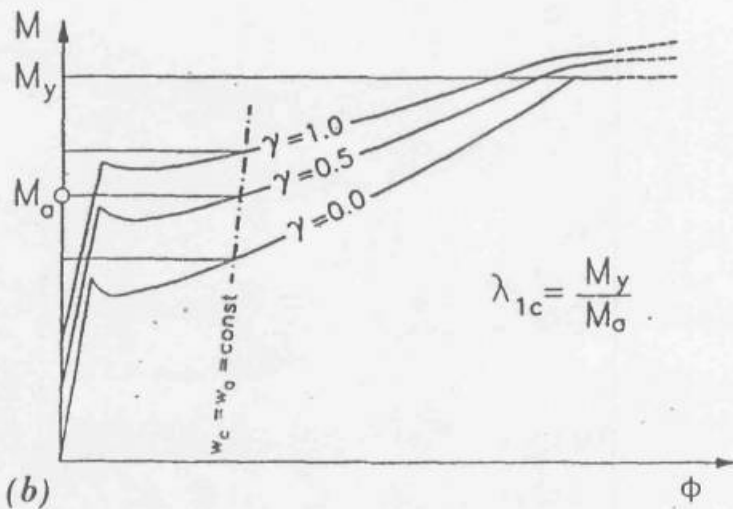
atau $\lambda_{1j} \geq \lambda_{1c} \quad \dots\dots\dots(5-3b)$

Penyelidikan tentang parameter retak i_c dan kriteria persyaratan 5-2 dan 5-3 untuk beton bertulang telah dilakukan oleh Cohn dan Lounis [30], [31].

Pendekatan umum yang lebih baik untuk mengontrol retak pada beton pratekan penuh maupun parsial didasarkan pada analisa lentur dari penampang beton struktur. Dengan mengambil derajat pratekanan $\tau = A_p \cdot f_{pu} / (A_s \cdot f_y + A_p \cdot f_{pu}) = 0$ (untuk beton bertulang biasa), $\tau = 0,5$ (untuk pratekan parsial) dan $\tau = 1$ (untuk pratekan penuh) ditunjukkan pada gambar berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 5.2.(a) Geometri penampang untuk studi parameter retak ; (b) Variasi tipikal dari Momen-Kurvatur untuk derajat prategangan tertentu.

Karena asumsi perilaku yang linier antara retak dan leleh, $M_p = M_y$, sehingga :

$$M_y = \lambda_{1c} \cdot M_a \dots\dots\dots(5-4a)$$

atau $\lambda_{1c} = M_y/M_a \dots\dots\dots(5-4b)$

dimana : M_y = momen leleh

λ_{1c} = faktor beban leleh

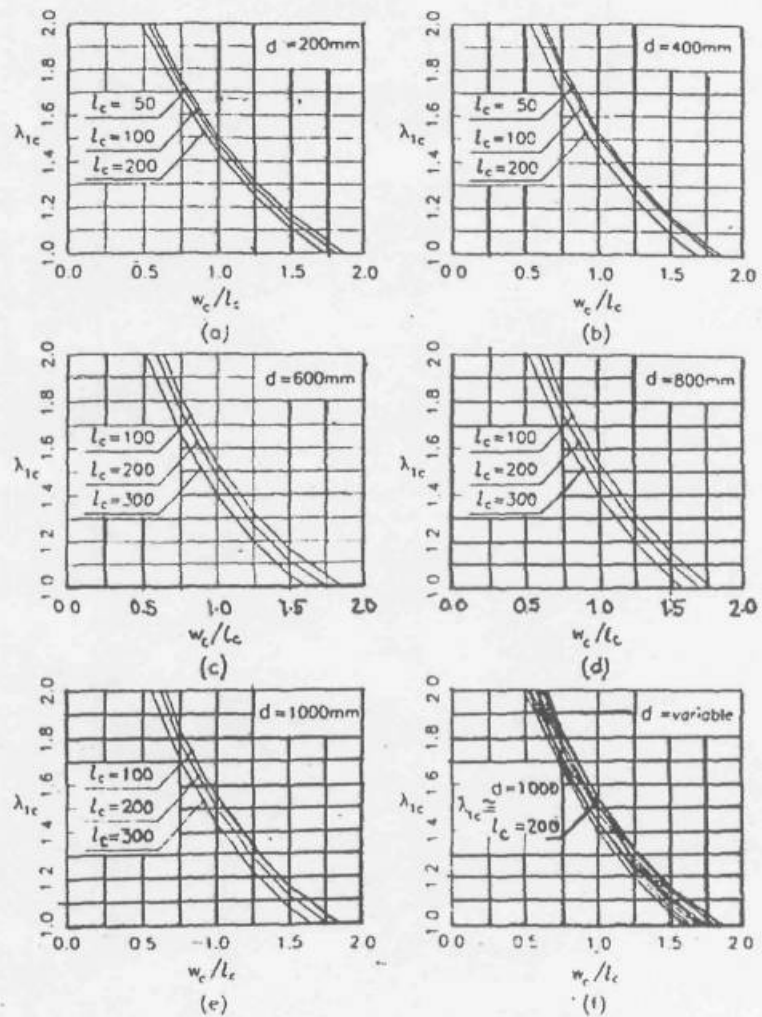
M_a = momen pada saat retak yang diijinkan

Kriteria tersebut dipenuhi apabila :

$$M_{1j} \geq M_y \dots\dots\dots(5-5a)$$

atau $\lambda_{1j} \geq \lambda_{1y} = M_y/M_a \dots\dots\dots(5-5b)$

Persyaratan lebar retak (5-3) dan (5-5) adalah identik, hanya parameter λ_{1c} didapat dari ratio beban (5-1) pada case I dan dari ratio momen (5-4) untuk case II.



Gambar 5.3. Pengaruh ratio penampang dan jarak retak pada parameter retak λ_{1c} (variabel d untuk nilai $b=500\text{mm}$; $w=0.1$; $\tau=0$; $f_c'=40\text{ MPa}$).

2.1. Studi Parameter λ_{1c} .

Penyelidikan yang lebih detail tentang parameter retak λ_{1c} dengan lebar retak yang diijinkan w_a , dan tegangan tarik beton pada saat retak σ_1 telah dilakukan pada 63 beton bertulang, beton pratekan parsial dan beton pratekan penuh dengan penampang seperti gambar 5-2a. Studi dengan program Mucuro untuk analisa penampang

beton non linier dengan tiap studi case didapatkan gambar 5.2b, faktor beban leleh ditemukan seperti persamaan (5-4) dengan nilai M_y dan M_a diidentifikasi dari simulasi komputer.

Pengaruh λ_{1c} pada parameter-parameter berikut telah dipelajari, yaitu :

- ratio penampang d/b
- jarak retak l_c
- indeks tulangan $w = (A_s.f_y + A_p.f_{pu}) / (b_w.d.f_c')$
- ratio baja tekan tarik $= w'/w = A_s'f_y / (A_s.f_y + A_p.f_{pu})$
- derajat prategangan $\tau = A_p.f_{pu} / (A_s.f_y + A_p.f_{pu})$
- mutu beton f_c'
- bentuk penampang

Mutu baja yang digunakan adalah Grade 60 (400 Mpa) dan Grade 270 (1860 MPa) masing-masing untuk tulangan non prategang dan tulangan prategang.

2.2. Pengaruh d/b dan l_c .

Pengaruh dari jarak retak l_c , dan ratio d/b pada λ_{1c} diperlihatkan pada gambar 5.3, dimana plot λ_{1c} - w_c/l diberikan untuk beberapa nilai λ_{1c} ($=50, 100, 200, 300\text{mm}$) dan d/b ($=0.4, 0.8, 1.2, 1.6$ dan 2.0), untuk beton bertulang ($\tau=0$) penampang persegi dengan $f_c'=40$ MPa, $b=500\text{mm}$, $w=0.1$ dan $w'=0.0$. Pilihan nilai l_c didasarkan pada perumusan Eurocode :

$$l_c = 50 + d_b / (10[r])$$

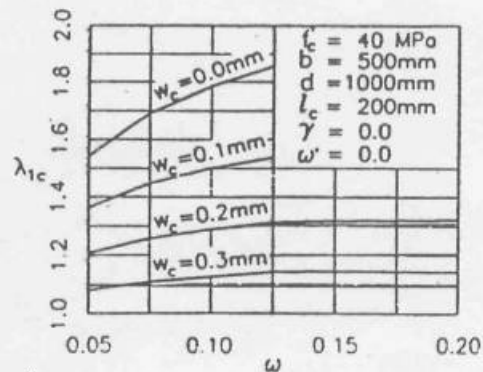
dimana

$$[r = A_s / [2.5b(h-d)]]$$

dengan hasil $50 \leq l_c \leq 300$ mm. Untuk tiap macam penulangan dan bentuk penampang, gambar 5.3 mengusulkan bahwa pengaruh l_c dan d/b (gambar 5.3f) pada λ_{1c} adalah kecil. Gambar 5.3f menunjukkan bahwa rata-rata nilai λ_{1c} mendekati untuk penampang dengan $d/b=2$ ($d=1000$ mm, $b=500$ mm) dan $l_c=200$ mm.

2.3. Pengaruh w_c .

Variasi dari λ_{1c} dan w_c untuk beberapa nilai w_c yang diijinkan digambarkan pada gambar 5.4. Nilai λ_{1c} meningkat dengan peningkatan nilai w_c dan lebih cepat pada lebar retak w_c yang lebih kecil.

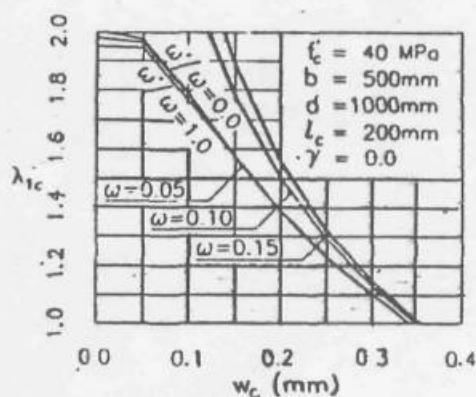


Gambar 5.4. Variasi tipikal dari λ_{1c} dengan indeks tulangan terhadap lebar retak.

Dalam menentukan nilai λ_{1c} , pengaruh w dapat diabaikan bila lebar retak minimal $w_c = 0,3$ tapi harus dipertimbangkan bila nilai w_c lebih rendah dari $0,3$.

2.4. Pengaruh w

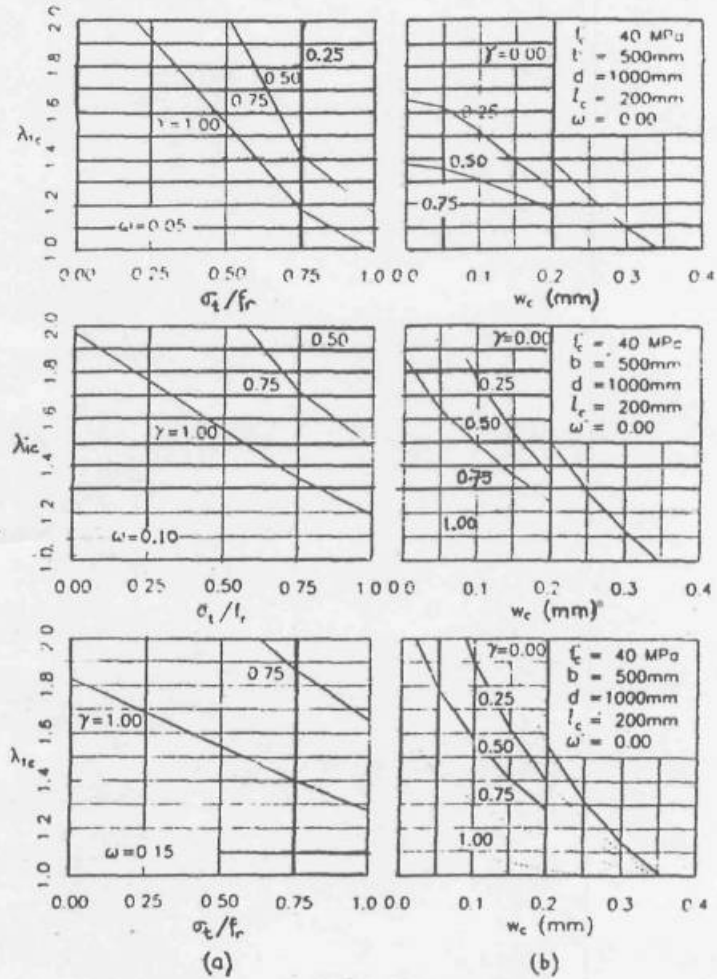
Gambar 5.5 menunjukkan bahwa pengaruh penulangan tekan pada λ_{1c} relatif kecil. Nilai λ_{1c} untuk penampang dengan tulangan tunggal dapat juga dipakai untuk penampang dengan tulangan ganda.



Gambar 5.5. Pengaruh dari penulangan tekan pada parameter retak λ_{1c} .

2.6. Pengaruh τ .

Pengaruh τ pada variasi $\lambda_{1c} - \sigma_1/f_r$ untuk penampang tanpa retak digambarkan pada gambar 5.6a dan $\lambda_{1c} - w_c$ untuk penampang retak pada gambar 5.6b masing-masing untuk indeks tulangan $w = 0.05, 0.1$ dan 0.15



Gambar 5.6. Pengaruh derajat prategangan pada parameter retak λ_{ic} , untuk (a) penampang tak retak ($\sigma_t/f_r < 1$); (b) penampang retak ($w_c > 0$).

Kurva solid pada gambar 5.6 menunjukkan penyelesaian praktis yang mudah dikerjakan untuk tiap nilai τ yang diberikan. Kurva titik-titik menunjukkan penyelesaian teoritis. Identifikasi penyelesaian yang dapat

dikerjakan mengikuti klasifikasi penampang beton struktur berdasarkan derajat prategangan τ dan syarat batas serviceability dalam desain. Klasifikasi ini diplot pada tabel 5.1

Section type (1)	γ (2)	SLS (3)
Reinforced concrete (RC)	0	$w_c \leq 0.4 \text{ mm}^*$
Reinforced concrete (RC)	0	$w_c \leq 0.2 \text{ mm}^*$
Partially prestressed concrete (PPC)	0 0.6	$w_c \leq 0.2 \text{ mm}^*$
Partially prestressed concrete (PPC)	0 0.6	$w_c \leq 0.1 \text{ mm}^*$
Limited prestressed concrete (LPC)	0.6 1.0	$\sigma_t \leq 0.75f_r$
Prestressed concrete (PC)	1.0	$\sigma_t = 0$

*Nonaggressive environment
 *Aggressive environment.

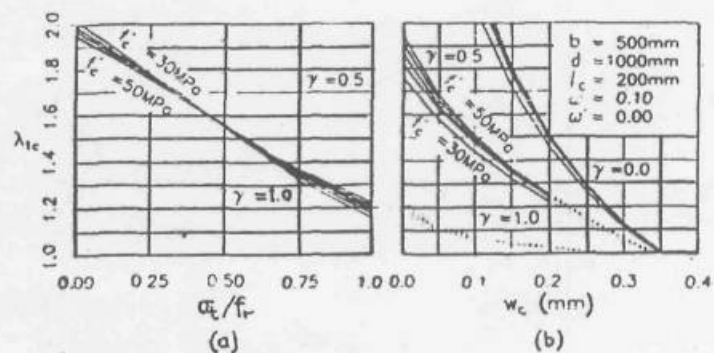
Tabel 5.1. Tipe beton struktur dan hubungannya dengan SLS.

Terlihat pada tabel bahwa $\tau=0.6$ adalah titik transisi antara RC dan PC. Gambar 5.6 menunjukkan :

- λ_{1c} menurun drastis dengan peningkatan nilai w_c atau σ_1/f_r .
- nilai λ_{1c} yang semakin kecil (karena w_c yang semakin besar atau σ_1/f_r yang semakin besar) mengakibatkan τ yang semakin besar, hal ini menyimpulkan bahwa dengan redistribusi yang besar akan juga membutuhkan derajat prestressing yang besar juga.

2.7. Pengaruh mutu beton f_c' .

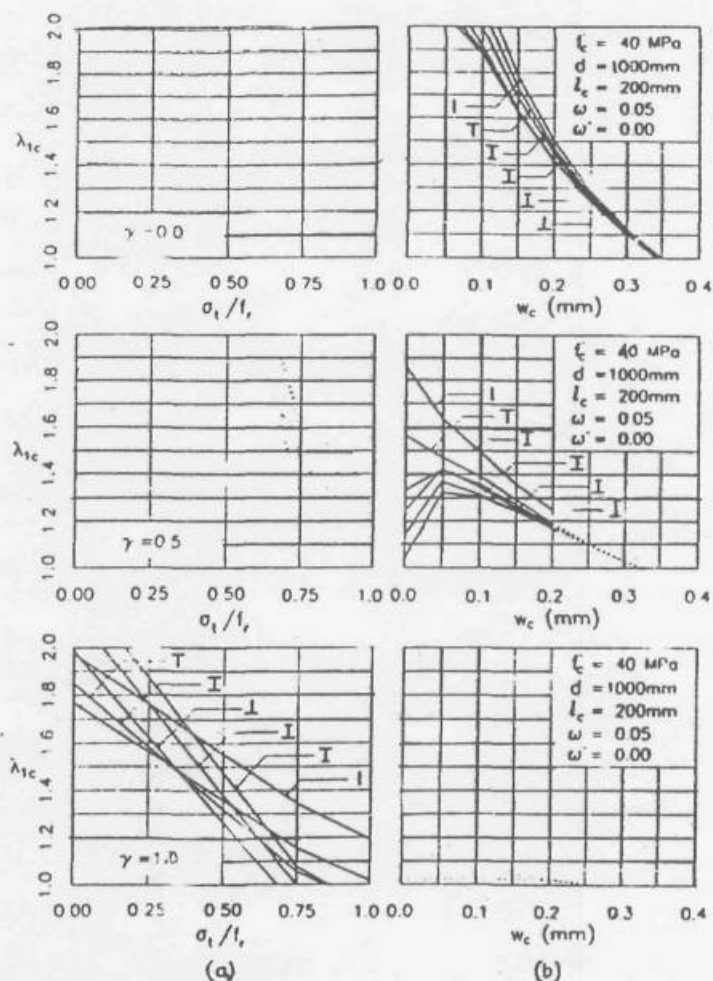
Gambar 5.7 menunjukkan bahwa untuk suatu nilai w_a , λ_{ic} menurun untuk suatu mutu beton tertentu. Meskipun begitu untuk nilai τ manapun variasi λ_{ic} dengan f_c' tidak beda banyak, sehingga mutu $f_c' = 40$ MPa dapat dipakai untuk semua mutu beton.



Gambar 5.7. Pengaruh mutu beton pada parameter retak λ_{ic} (a) penampang retak ($\sigma_t/f_r < 1$); (b) penampang retak ($w_c > 0$).

2.8. Pengaruh bentuk penampang.

Pengaruh bentuk dan geometri penampang (gambar 5.2a) pada λ_{ic} digambarkan pada gambar 5.8 dibawah ini. Kurva solid menunjukkan penyelesaian praktis dan kurva titik-titik penyelesaian teoritis. Bentuk persegi mewakili "upper bound" untuk semua case. Pengaruh bentuk penampang lebih kelihatan pada nilai τ yang lebih tinggi.



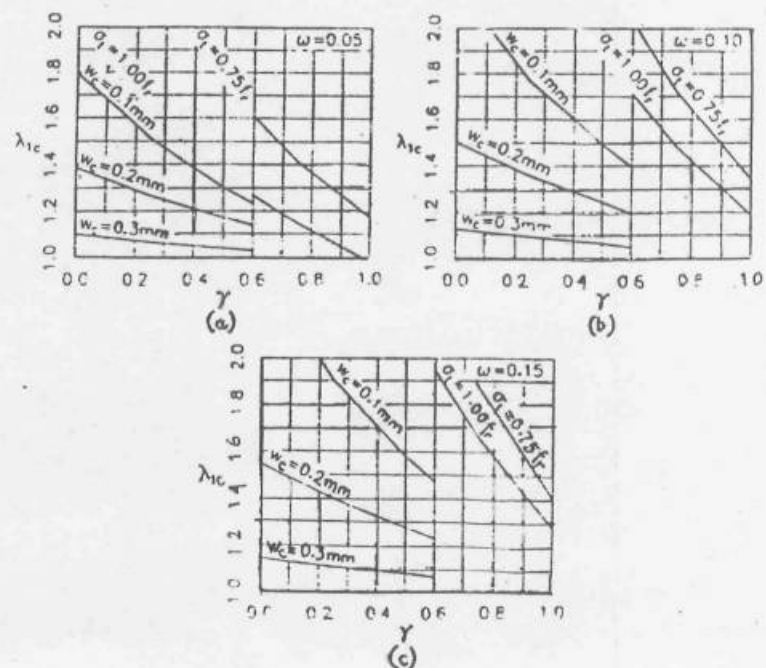
Gambar 5.8. Pengaruh dari bentuk penampang terhadap parameter retak λ_{1c} , dengan variasi derajat prategangan : (a) penampang tidak retak ($\sigma_1/f_r < 1$); (b) penampang retak ($w_c > 0$).

2.9. Aplikasi untuk desain.

Hasil dari studi parameter-parameter di atas menggambarkan yang menentukan dalam pengontrolan serviceability adalah indeks tulangan w , derajat prestressing τ , dan lebar retak yang diijinkan w_s . Gambar 5.9 a,b,c menunjukkan hubungan $\lambda_{1c}-\tau$ untuk nilai $w_s=w_c$ ($=0.1, 0.2, 0.3\text{mm}$) dan σ_1/f_r ($=0.75$ dan 1) saat $w=0.05, 0.1, 0.15$. Lagi, transisi antara perilaku RC dan PC diasumsikan pada $\tau=0.6$.

Plot pada gambar 5.9 menunjukkan :

- dengan nilai w dan τ tertentu, nilai w_c yang lebih besar memerlukan λ_{1c} yang lebih kecil, hal ini memungkinkan redistribusi momen yang lebih besar.
- dengan nilai w dan $w_c = w_a$ tertentu, nilai τ yang lebih besar akan membutuhkan nilai λ_{1c} yang lebih kecil.
- untuk nilai $w_c = w_a$, nilai λ_{1c} meningkat bersama w , kemudian penulangan yang kuat mengurangi potensial redistribusi momen.
- kenaikan nilai w_a dan τ meningkatkan serviceability dan potensial redistribusi, kejadian sebaliknya bila nilai w juga meningkat.

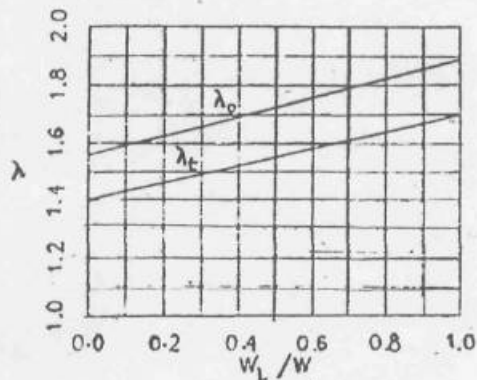


Gambar 5.9. Alat desain : Variasi dari λ_{1c} dengan derajat prategangan τ untuk lebar retak tertentu w_c dan indeks tulangan w .

3 Redistribusi momen dan hubungannya dengan parameter retak.

Saat terjadi sendi plastis pertama, yaitu pada penampang kritis j , beban yang bekerja W_{1j} dan parameter beban λ_{1j} . Besarnya λ_{1j} ($= \lambda_{1c}$) diperoleh dari gambar 5.8. Suatu parameter yang membatasi agar struktur tidak terjadi sendi plastis (leleh) yang mana akan menyebabkan retak ditunjukkan sebagai ratio antara kapasitas leleh penampang λ_{1j} dengan keamanan secara keseluruhan dari struktur λ_0 :

$$x \text{ maks} = x_{1j} = \frac{\lambda_{1j}}{\lambda_0} \dots \dots \dots (5-6)$$



Gambar 5.10: Variasi dari faktor beban total dengan ratio antara beban hidup dan beban total.

Redistribusi momen yang diijinkan dinyatakan dalam

$$y_{1j} = \delta M_u / M_u \dots\dots\dots(5-7a)$$

$$= 1 - x_{maks} \dots\dots\dots(5-7b)$$

4. Langkah desain.

1. Mencari besarnya redistribusi maksimum y_{1j} , yang diperbolehkan tanpa melewati batas lebar retak yang diijinkan dengan langkah :

- untuk suatu beban W_D dan W_L , W_L/W kemudian dapatkan λ_0 dengan gambar 5.10.
- dengan nilai $w_c = w_a$, τ dan w , tentukan λ_{1c} dengan gambar 5.9.
- dengan perumusan 5-6 dapatkan nilai x_{1j} dan perumusan 5-7b untuk y_{1j} (redistribusi momen maksimum).

2. Pengontrolan lebar retak.

Dengan nilai untuk w, τ dan redistribusi momen y_1 .

- dari perumusan 5-6, $\lambda_{1j} = \lambda_0 \cdot x_{1j}$
 $= \lambda_0(1 - y_1)$
- dengan nilai $w_c = w_a, \tau$ dan w dapat dicari λ_{1c} dari gambar 5.9.
- dengan syarat $y_1 \leq y_c$, redistribusi momen y_1 dapat diterima.

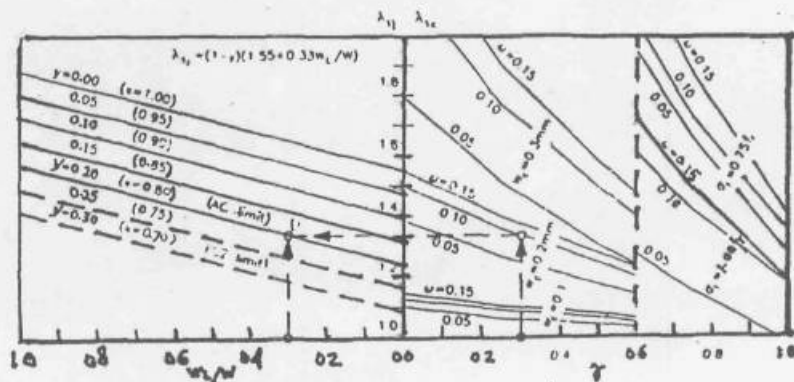
3. Pengambilan derajat prategangan yang diinginkan.

Untuk suatu penampang dengan nilai w dan tegangan tarik yang diijinkan σ_1 atau retak $w_c = w_a$, nilai τ yang dihubungkan dengan redistribusi momen y_1 didapatkan.

- dengan $y_1 = 1 - \lambda_{1j} / \lambda_0$
- dengan W_L/W cari λ_0 dari gambar 5.10
- untuk $\lambda_{1j} = (1 - y_1) \lambda_0 = \lambda_{1c}$, w dan σ_1 (atau w_e) dapat diketahui τ dari gambar 5.9

Gabungan gambar 5.9 dan 5.10 dapat dipakai secara langsung dalam desain seperti ditunjukkan pada gambar 5.11 dibawah ini dengan melakukan langkah-langkah sesuai arah tanda panah.

Misal diberi nilai $\tau=0.5$; $w=0.10$; $W_L/W=0.3$; dan $w_e=0.2$ mm, kita menginginkan besarnya redistribusi momen yang dapat dilakukan yang sekaligus mengontrol lebar retak yang diijinkan. Masukkan nilai $\tau=0.3$ tarik garis ke atas sampai memotong garis untuk $w=0.1$ pada daerah $w_e=0.2$ mm, kemudian tarik garis ke kiri ke arah ordinat λ_{1c} , dan potongkan ke garis vertikal pada $W_L/W=0.3$. Titik pertemuan (titik D) adalah penyelesaiannya yaitu untuk $x_i=0.80$ dan $y_i=0.20$ yang berarti bisa dilakukan redistribusi momen sebesar 20% .



Gambar 5.11. Desain dengan variabel utama, λ_{1c} - $y(x) = W_L/W - \tau - w/w_c$.

SLS (1)	γ (2)	Structural concrete (3)	λ_s (4)	χ_s (5)	η_s (6)
$w_c = w_a = 0.4$ mm	0.00	RC	< 1.00	0.56	0.44
$w_c = w_a = 0.3$ mm	0.00	RC	1.13	0.63	0.37
$w_c = w_a = 0.2$ mm	0.00	RC	1.50	0.84	0.16
$w_c = w_a = 0.2$ mm	0.25	PPC	1.35	0.76	0.24
$w_c = w_a = 0.2$ mm	0.30	PPC	1.25	0.70	0.30
$w_c = w_a = 0.1$ mm	0.00	RC	> 1.78	1.00	0.00
$w_c = w_a = 0.1$ mm	0.50	P'PC	> 1.50	0.84	0.10
$w_c = w_a = 0.1$ mm	0.60	P'PC	> 1.40	0.79	0.21
$\sigma_s = 0.75f_r$	1.00	LPC	1.35	0.76	0.24
$\sigma_s = 0.0$	1.00	PC	> 1.78	1.00	0.00

Tabel 5.2. Redistribusi momen yang boleh dilakukan sehubungan dengan SLS yang diperlukan.