



TKS 330118

Perilaku dan Desain Struktur Beton Lanjut

Program Magister Teknik Sipil, Rekayasa Struktur
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.
Available on: <http://bit.ly/S2StrukturBetonLanjut>

Pengujian kuat tekan beton

Silinder beton yang mendapat beban uniaksial idealnya mengalami retak yang paralel dengan arah pembebanan. Bentuk awal kurva tegangan-regangan beton berbentuk *elastic linear curve* yang kemudian melengkung ke atas (*non-linear*) sampai dengan puncak (*ascending curve*), kemudian turun (*descending curve*). Hal ini disebabkan oleh friksi antara permukaan beton dengan pelat baja yang merupakan bagian alat uji tekan beton.

2 Strain gauge horizontal dan 2 strain gauge vertikal



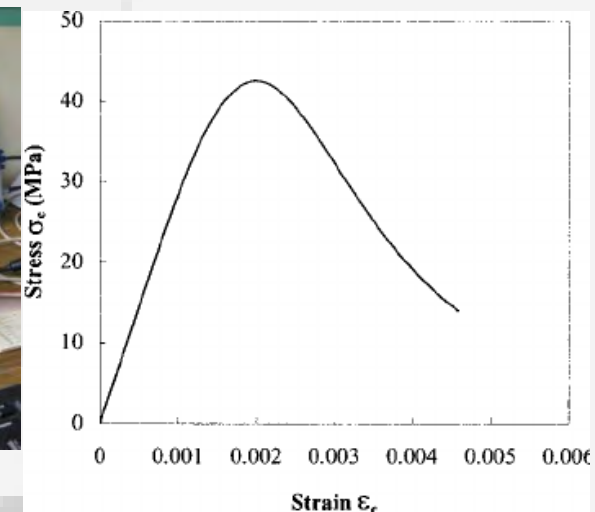
Tampak depan silinder yang diuji tekan beban uniaksial. Sumber: : Nurjannah, 2016.



Tampak belakang silinder yang diuji tekan beban uniaksial. Sumber: : Nurjannah, 2016.



Data logger untuk merekam data hasil uji. Sumber: Nurjannah, 2016.



Kurva tegangan (*stress*) – regangan (*strain*) beton.

Silinder beton di bawah beban tekan dan tarik

ϵ_1 : regangan longitudinal
 ϵ_3 : regangan transversal
 σ_1 : tegangan aksial

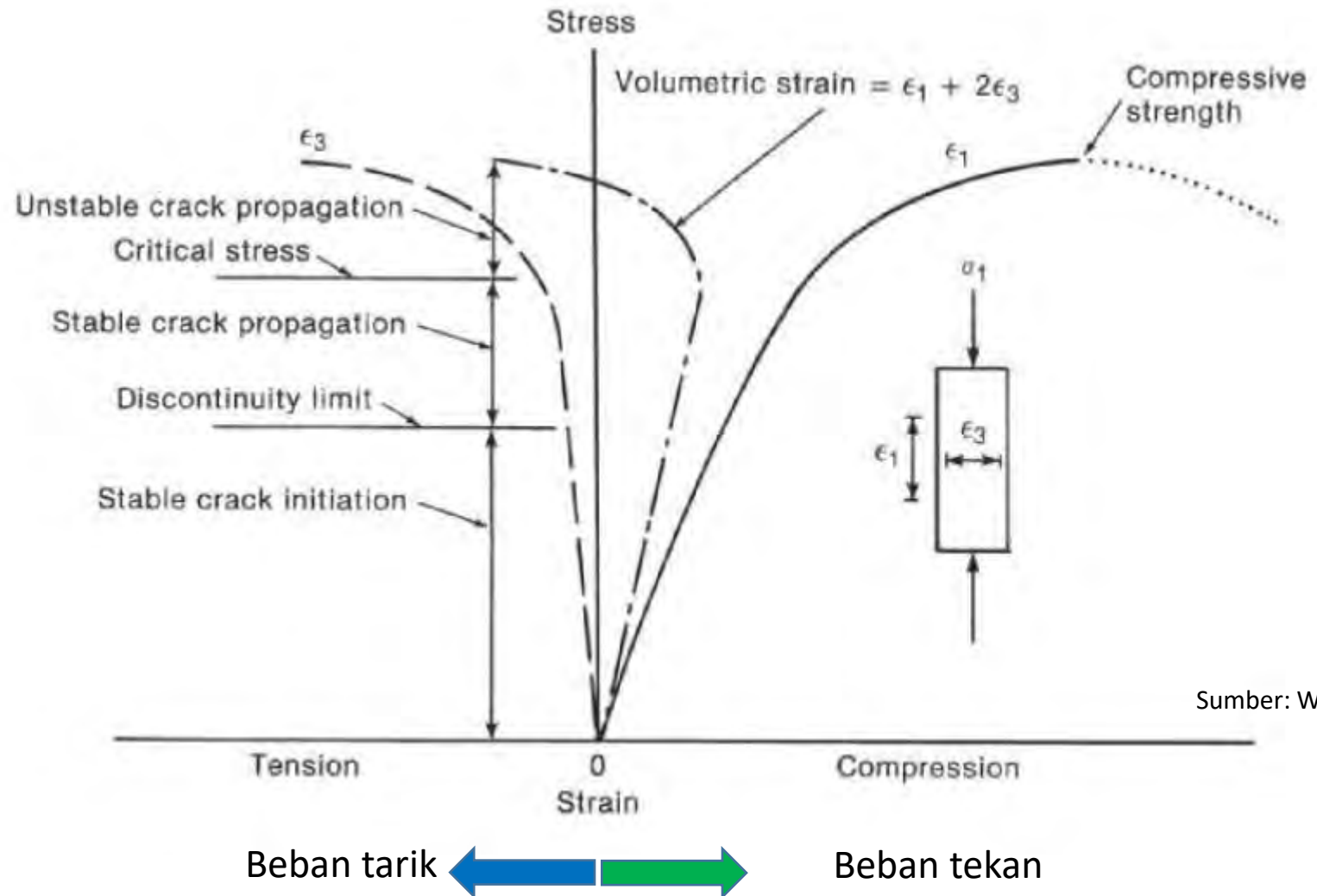


Fig. 3-1
Stress-strain curves for
concrete loaded in uniaxial
compression. (From [3-2].)

Sumber: Wight, 2016

Jenis keruntuhan tekan

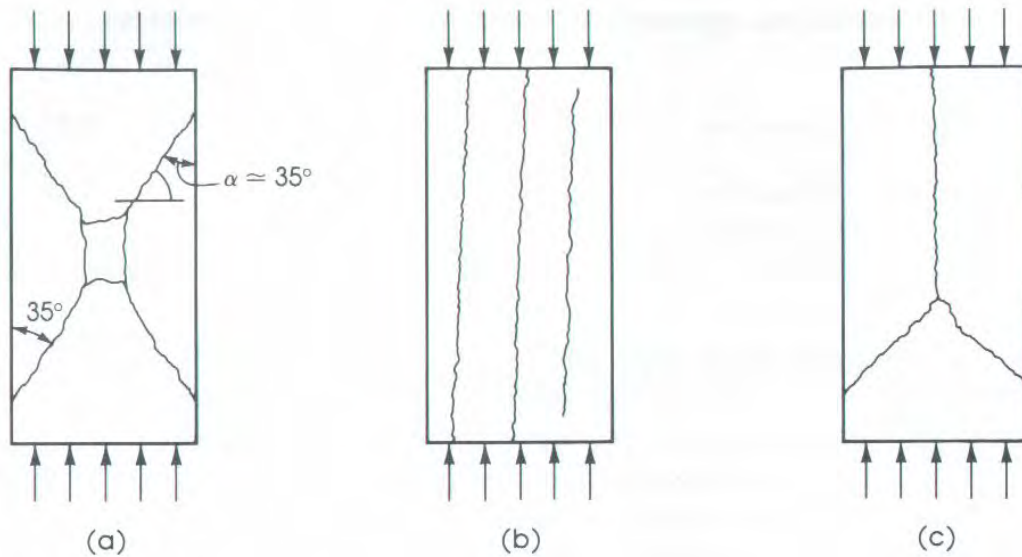


FIGURE 2.1. Modes of failure of standard concrete cylinders.

Terdapat tiga jenis keruntuhan pada silinder beton yang mendapat beban tekan aksial:

- (a) Runtuh dalam bentuk geser, atau
- (b) Pemisahan sampel beton menjadi bagian-bagian kolom memanjang (*splitting*), atau
- (c) Kombinasi keruntuhan geser dan *splitting*

ILMU ALAT PENG

Kurva hubungan tegangan-regangan beton

Tegangan beton meningkat (*ascending branch*) sampai nilai maksimum dengan nilai regangan sebesar antara 0,0015 – 0,003, kemudian diikuti dengan penurunan kurva (*descending branch*).

Bentuk kurva dipengaruhi oleh terjadinya retak mikro yang semakin besar dalam beton.

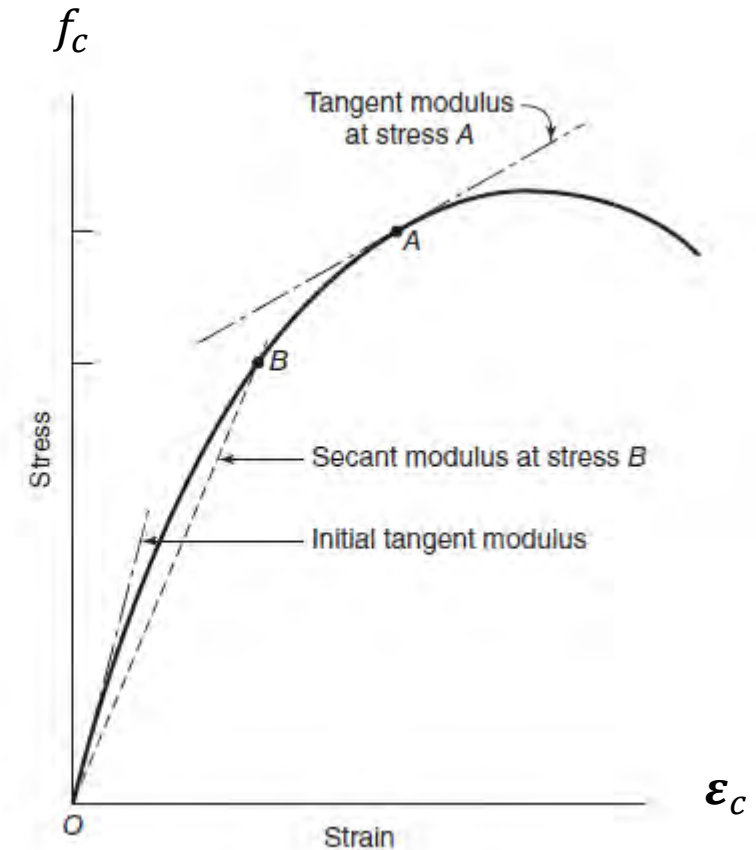


Fig. 3-17
Tangent and secant moduli of
elasticity.

Sumber: Wight, 2016

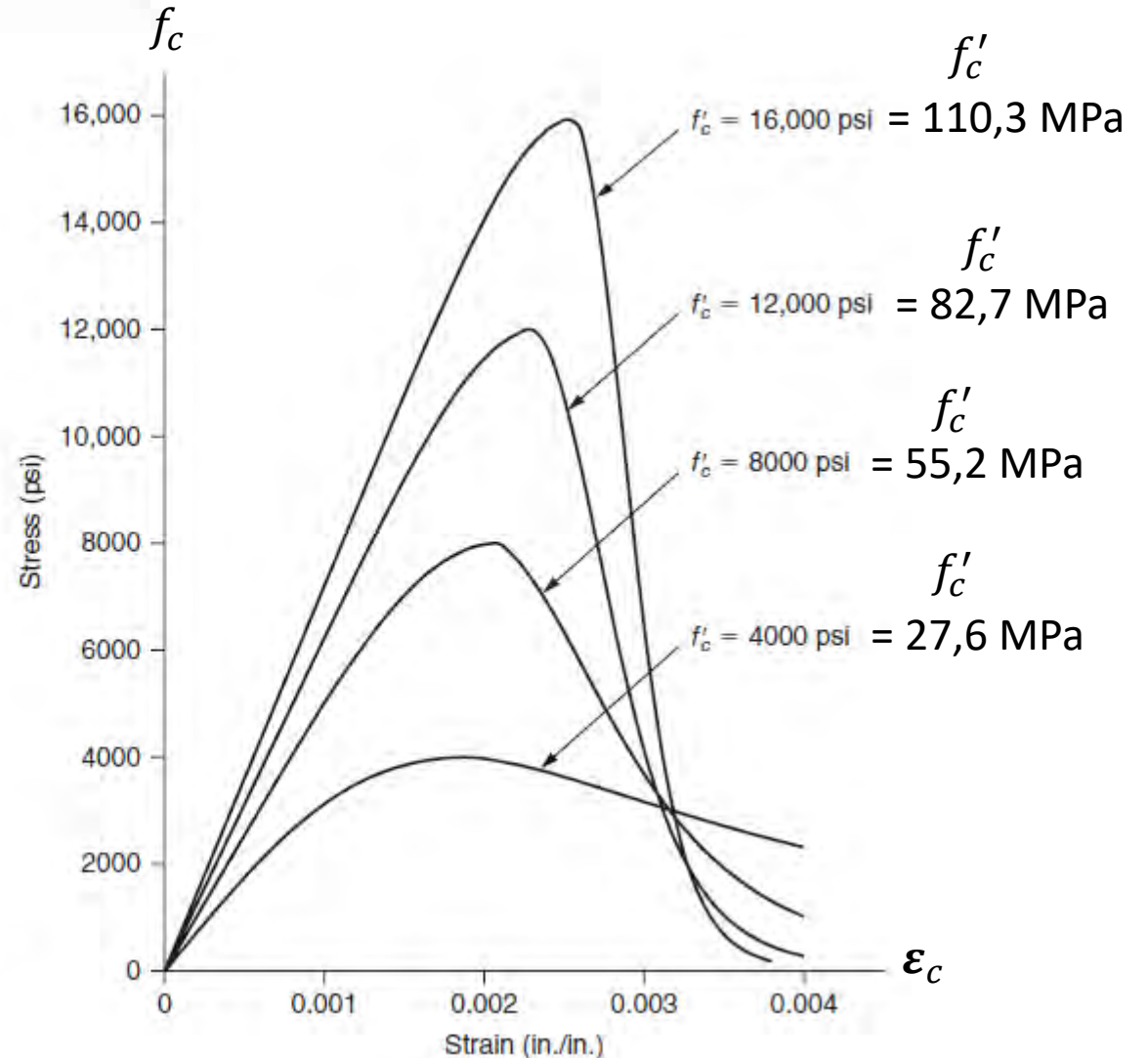
Beton mutu tinggi

Karena mutu beton (f'_c) meningkat, pada beberapa kurva hubungan tegangan-regangan, terjadi:

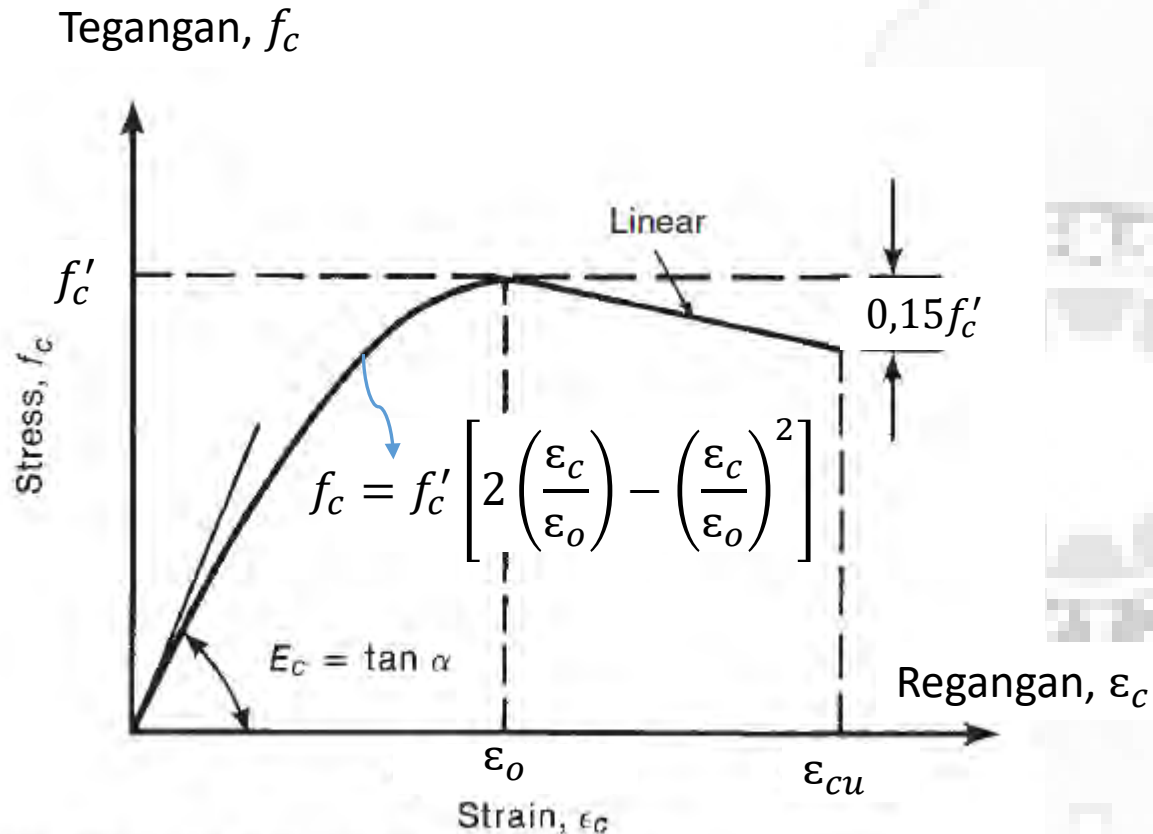
1. Peningkatan kekakuan (E_c) dan kekuatan (f_c)
2. Penurunan perubahan bentuk (*deformability*) karena semakin kaku,
3. Rentang linearitas (sebanding dengan kekakuan) pada kurva di bagian kurva naik (*ascending branch*)
4. Kecuraman kurva turun pasca puncak (di bagian *descending branch*)
5. Nilai regangan saat f'_c tercapai (ϵ_o)
6. Nilai regangan maksimum (ϵ_{cu})

Fig. 3-18
Typical concrete stress-strain curves in compression.
[Plotted using Eqs. (3-20) to (3-26).]

Sumber: Wight, 2016



Hubungan tegangan-regangan beton normal



(a) Modified Hognestad. (From [3-37].)

Persamaan kurva tegangan-regangan silinder beton dalam **persamaan Hognestad** yang dimodifikasi:

$$f_c = f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

dengan:

- ε_{cu} : regangan tekan *ultimate* beton (mm/mm) = 0,003 (beton normal)
- ε_0 : regangan tekan beton pada tegangan *ultimate* (f'_c) (mm/mm) \approx 0,002 (beton normal)
- σ_c atau f_c : tegangan tekan beton (MPa = N/mm²)
- f'_c : kuat tekan uniaksial atau tegangan *ultimate* beton (MPa = N/mm²)
- E_c : modulus elastisitas beton (MPa)

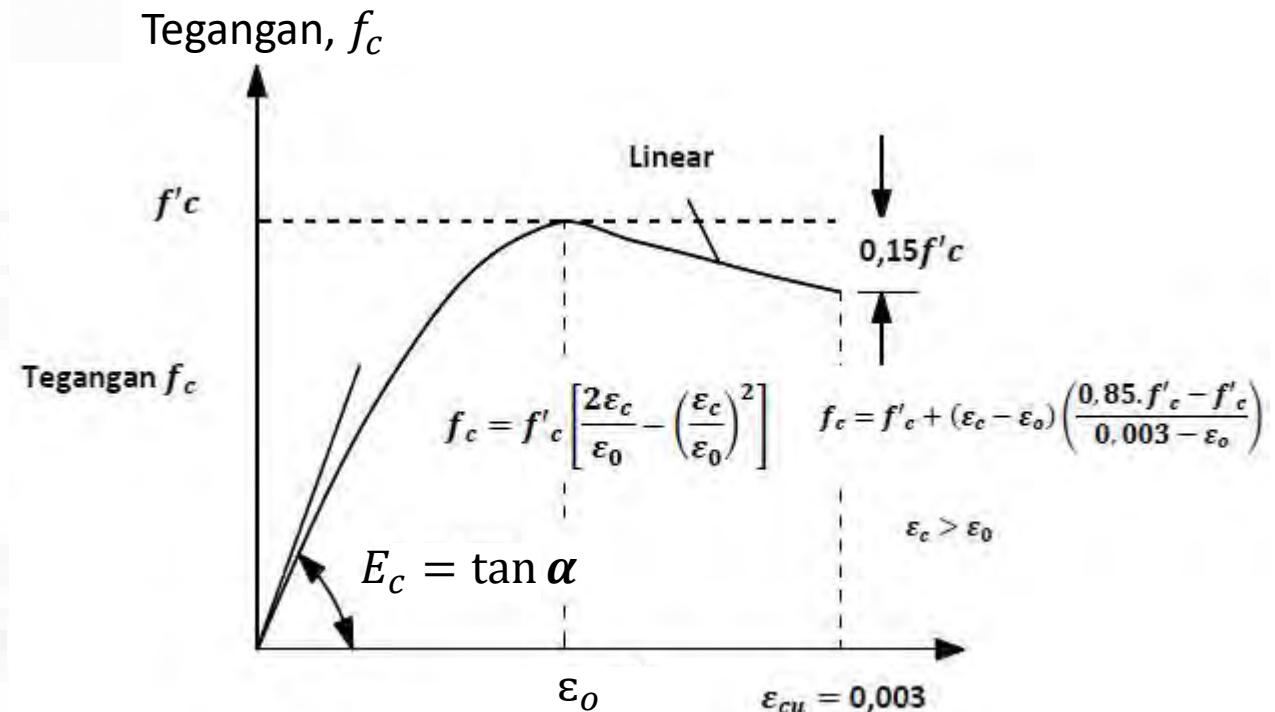
Kurva tegangan-regangan beton dalam **persamaan Hognestad**

Sumber: Wight, 2016

Material beton

Pada kurva tegangan-regangan beton, perilaku beton dibagi menjadi tiga bagian:

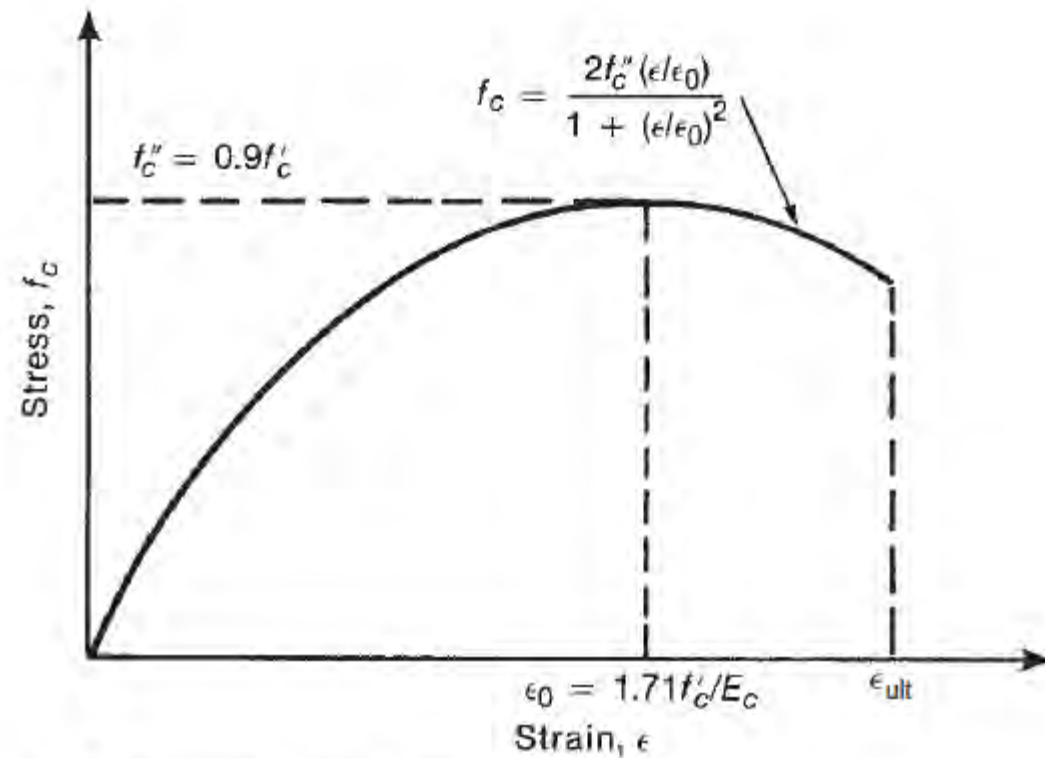
1. Pada saat tegangan silinder beton adalah 30%-40% dari kuat tekan uniaksial atau tegangan *ultimate* (f'_c), hubungan tegangan-regangan beton adalah linier.
2. Pada saat tegangan silinder beton adalah di atas 30%-40% f'_c , maka kurva mulai berbentuk non-linear dengan sudut kemiringan tertentu. Retakan pada silinder mulai terbentuk.
3. Pada saat tegangan beton adalah 75%-90% f'_c , maka kurva non-linear terus terbentuk dengan sudut kemiringan yang semakin kecil.



Kurva tegangan-regangan beton dengan persamaan **Hognestad**

Sumber: Wight, 2016

Hubungan tegangan-regangan beton normal

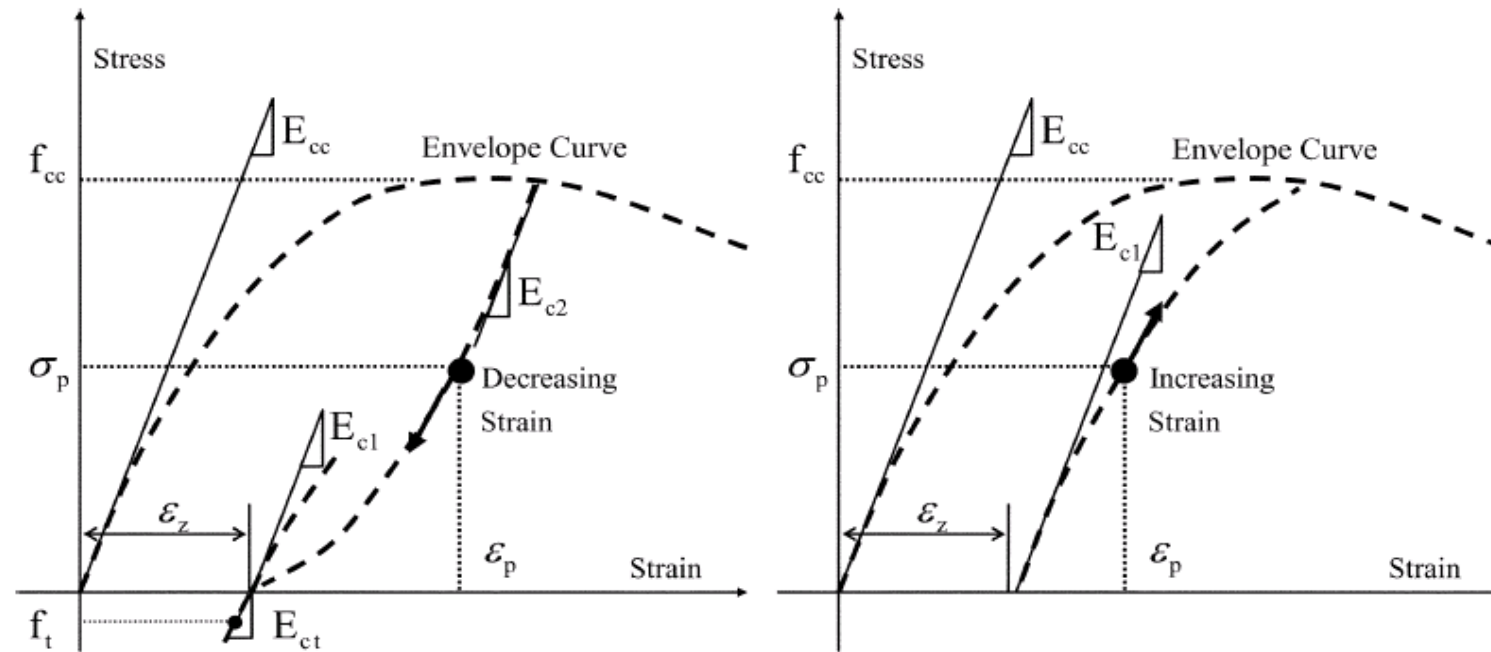


(b) Todeschini. (From [3-39].)

Kurva tegangan-regangan beton dalam persamaan **Todeschini**

Sumber: Wight, 2016

Perilaku beton di bawah beban aksial siklik



ILMU ALAT PENGABDIAN

Perilaku beton di bawah beban aksial siklik

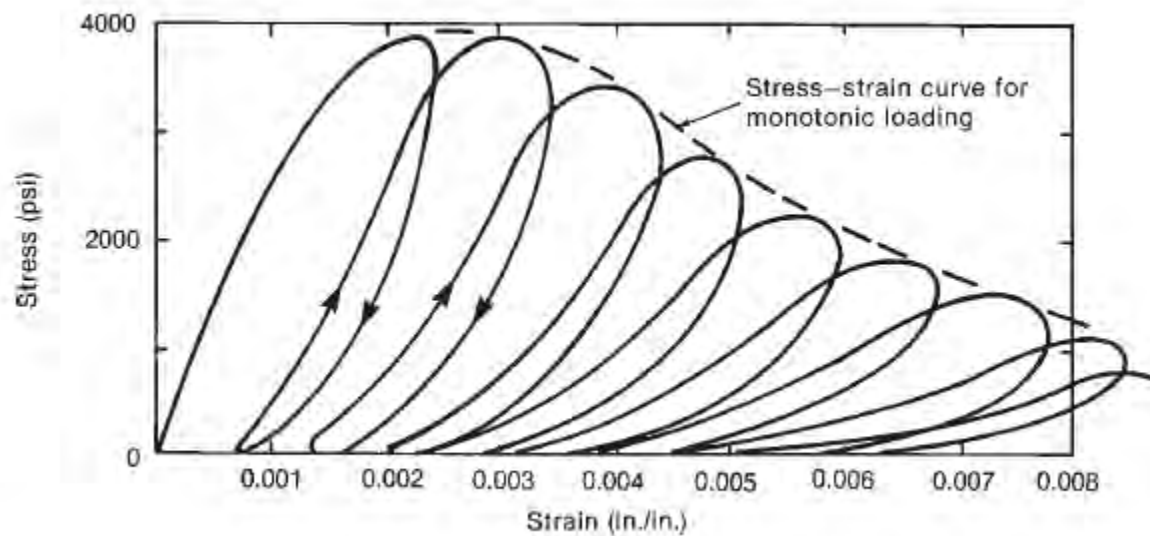


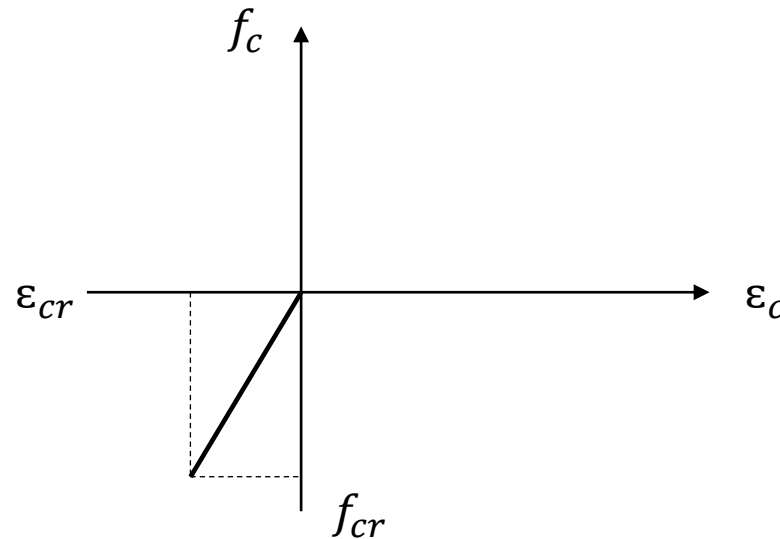
Fig. 3-20
Compressive stress-strain
curves for cyclic loads.
(From [3-43].)

ILMU ALAT PENGABDIAN

Sumber: Wight, 2016

Kuat tarik beton (f_{cr})

Beton bersifat getas (*brittle*). Kuat tarik beton adalah sekitar 10% nilai kuat tekan uniaksial (f'_c) (Imran dan Zulkifli, 2014). Hubungan tegangan-regangan beton di bawah beban tarik adalah linier. Retak terjadi akibat penambahan beban dan diikuti dengan keruntuhan beton.

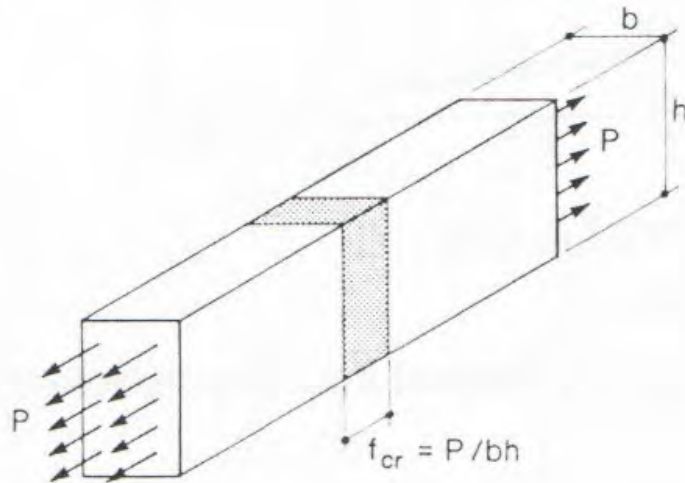


Hubungan tegangan-regangan tarik beton

Kuat tarik beton (f_s)

Nilai kuat tarik beton dapat diperoleh melalui pengujian tarik. Beberapa jenis pengujian tarik adalah:

1. Pengujian tarik langsung



(a) Direct tension test

$$f_s = 0,33\lambda\sqrt{f'_c}$$

f_s : kuat tarik/tegangan tarik yang dihitung dalam tulangan saat beban layan (MPa)

λ : lihat Tabel 19.2.4.2 di SNI 2847: 2019

Sumber: SNI 2847:2019 Pasal R11.5.4.6

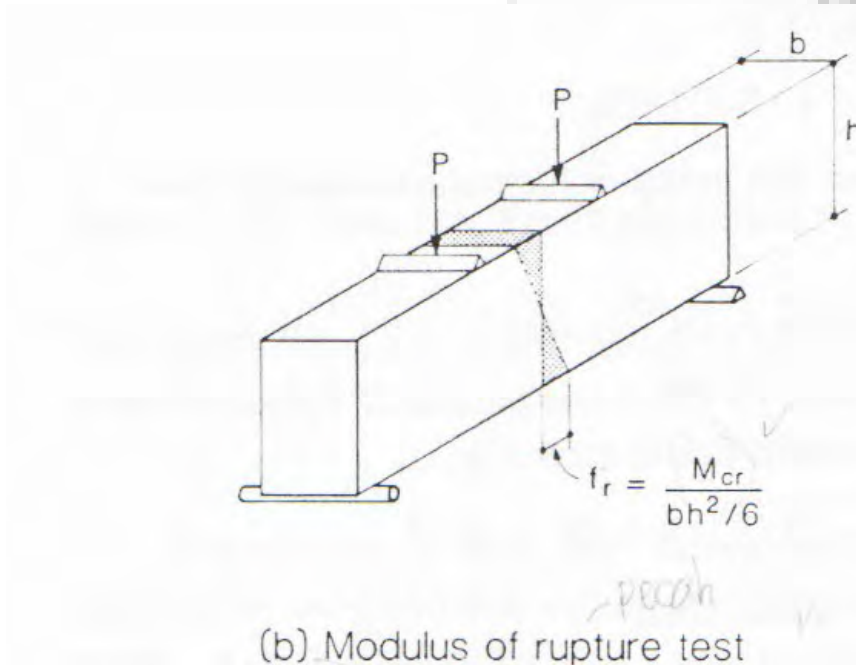
Pengujian tarik langsung

(Sumber: Collins dan Mitchell, 1994)

Kuat tarik beton (f_r)

2. Pengujian tarik tidak langsung

a. Uji lentur



Modulus retak beton:

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f'_c}$$

λ : lihat Tabel 19.2.4.2 di SNI 2847: 2019

Sumber: SNI 2847:2019 Pasal **19.2.3.1**

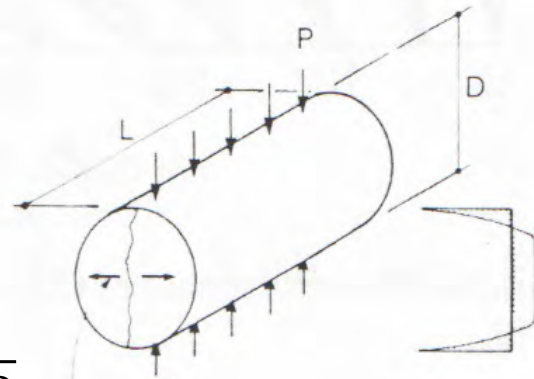
Pengujian modulus keruntuhan (*modulus of rupture*)

(Sumber: Collins dan Mitchell, 1994)

Kuat tarik beton (f_{ct})

b. Uji belah

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD}$$



Pengujian retak pada silinder
(Sumber: Collins dan Mitchell, 1994)



Set up Uji Tarik-Belah
Silinder

Sumber: : Nurjannah, 2016



Kondisi silinder
setelah runtuh

Sumber: : Nurjannah, 2016

Nilai λ

19.2.4.3 Jika hasil pengukuran kekuatan tarik belah rata-rata beton ringan, f_{ct} , digunakan untuk menghitung λ , uji laboratorium harus dilakukan sesuai **ASTM C330M** untuk menentukan nilai f_{ct} dan nilai f_{cm} yang bersesuaian dan λ dapat dihitung menggunakan:

$$\lambda = \frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0 \quad (19.2.4.3)$$

Campuran beton yang diuji untuk menghitung λ harus mencerminkan campuran yang digunakan di pada pekerjaan tersebut.

Keterangan:

f_{cm} : kekuatan tekan beton rata-rata terukur (MPa)

f_{ct} : kekuatan tarik belah rata-rata terukur beton ringan (MPa)

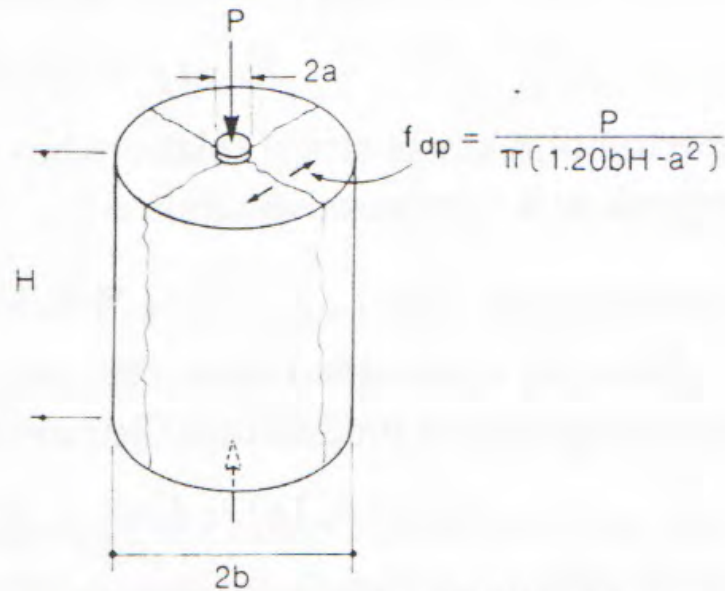
λ : faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, semuanya relatif terhadap beton normal dengan kekuatan tekan yang sama

λ : lihat Tabel 19.2.4.2 di SNI 2847: 2019

Sumber: SNI 2847:2019

Kuat tarik beton (f_{cr})

c. Uji *double-punch*



(d) Double-punch test ($f_{cr} \approx 0.7f_{dp}$)

Pengujian *double-punch*

(Sumber: Collins dan Mitchell, 1994)

Kuat tarik beton (f_s)

Hubungan kuat tarik langsung beton sebagai fungsi dari kuat tekan uniaksial beton adalah:

$$f_s = 0,33\lambda\sqrt{f'_c} \text{ (SNI 2847:2019 Pasal R11.5.4.6)}$$

dengan:

- f_s : kuat tarik atau tegangan tarik yang dihitung dalam tulangan saat beban layan (MPa)
- f'_c : kekuatan tekan beton yang disyaratkan (MPa = N/mm²)
- λ : faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan; untuk beton normal, nilai $\lambda = 1$, lihat Tabel 19.2.4.2 di SNI 2847: 2019

Modulus hancur (*rupture*) atau retak beton (f_r)

Untuk kasus defleksi, nilai modulus hancur (*rupture*) atau retak beton akibat beban lentur:

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f'_c} \text{ (SNI 2847:2019 Pasal 19.2.3.1)}$$

Untuk analisis kuat geser beton pra-tegang, nilai modulus keruntuhan lentur beton:

$$f_r = 0,50\lambda\sqrt{f'_c} \text{ (SNI 2847:2019 Pasal R22.5.8.3.1)}$$

dengan:

f_r : kuat tarik akibat lentur (MPa)

f'_c : kekuatan tekan beton yang disyaratkan (MPa = N/mm²)

λ : faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan; untuk beton normal, nilai $\lambda = 1$, lihat Tabel 19.2.4.2 di SNI 2847: 2019

Silinder

19.2.3 Modulus retak

19.2.3.1 Modulus retak beton f_r dapat dihitung dengan menggunakan:

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (19.2.3.1)$$

Dimana nilai λ diambil sesuai dengan 19.2.4

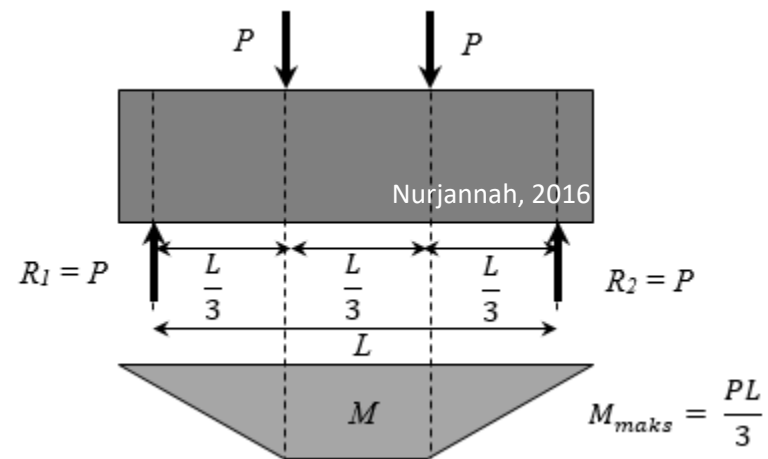
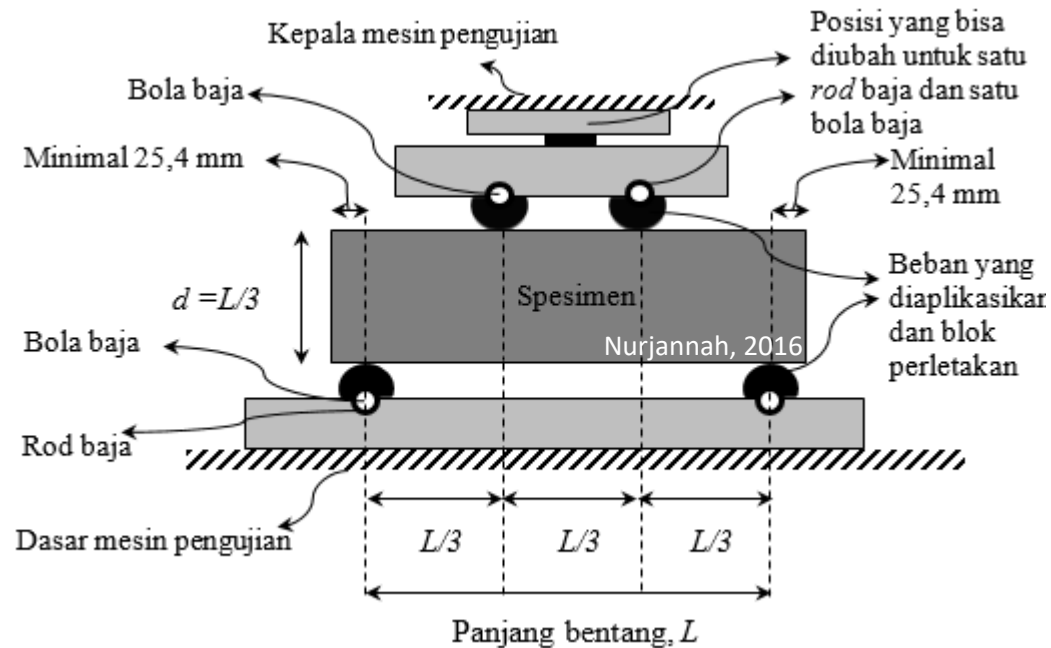
Tabel 19.2.4.2 – Faktor modifikasi λ

Beton	Komposisi Agregat	λ
Beton ringan dengan semua agregat ringan	Halus: ASTM C330M Kasar: ASTM C330M	0,75
Beton Ringan, agregat halus campuran	Halus: Kombinasi ASTM C330M dan C33M Kasar: ASTM C330M	0,75 s/d 0,85 ^[1]
Beton ringan dengan pasir ringan	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C330M	0,85
Beton ringan dengan pasir ringan, dan agregat kasar campuran	Halus: ASTM C33M Kasar: Kombinasi ASTM C330M dan C33M	0,85 s/d 1 ^[2]
Beton normal	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C33M	1

^[1]Interpolasi linear dari 0,75 hingga 0,85 diizinkan berdasarkan perbandingan dari volume absolut agregat halus normal dan total volume absolut agregat halus.

^[2]Interpolasi linerar dari 0,85 hingga 1 diizinkan berdasarkan perbandingan dari volume absolut agregat kasar normal dan total volume absolut agregat kasar.

Modulus keruntuhan lentur beton (f_r)



Set up uji lentur balok

Gaya dalam momen pada uji lentur

Pengujian lentur balok beton tanpa tulangan baja

Sumber: Nurjannah, 2016.

Modulus keruntuhan lentur beton (f_r)



Set up pengujian lentur balok



Kondisi balok di akhir pengujian

Pengujian Lentur Balok

Sumber: Dokumentasi pengujian, Nurjannah, 2016

ILMU ALAT PENGABDIAN

Modulus elastisitas beton (E_c)

Modulus elastisitas beton:

$$E_c = w_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \text{ (SNI 2847:2019 Pasal 19.2.2.1.a)}$$

dengan $w_c = 1400 - 2560 \text{ kg/m}^3$ (massa jenis beton normal), maka untuk beton normal, dapat menggunakan persamaan yang lebih praktis, yaitu:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ (SNI 2847:2019 Pasal 19.2.2.1.b)}$$



Set up Pengujian Modulus Elastisitas Statik

Sumber: Nurjannah, 2016



Set up Pengujian Modulus Elastisitas Statik dan *Poisson's Ratio*.

Sumber: Gedney, 2010.

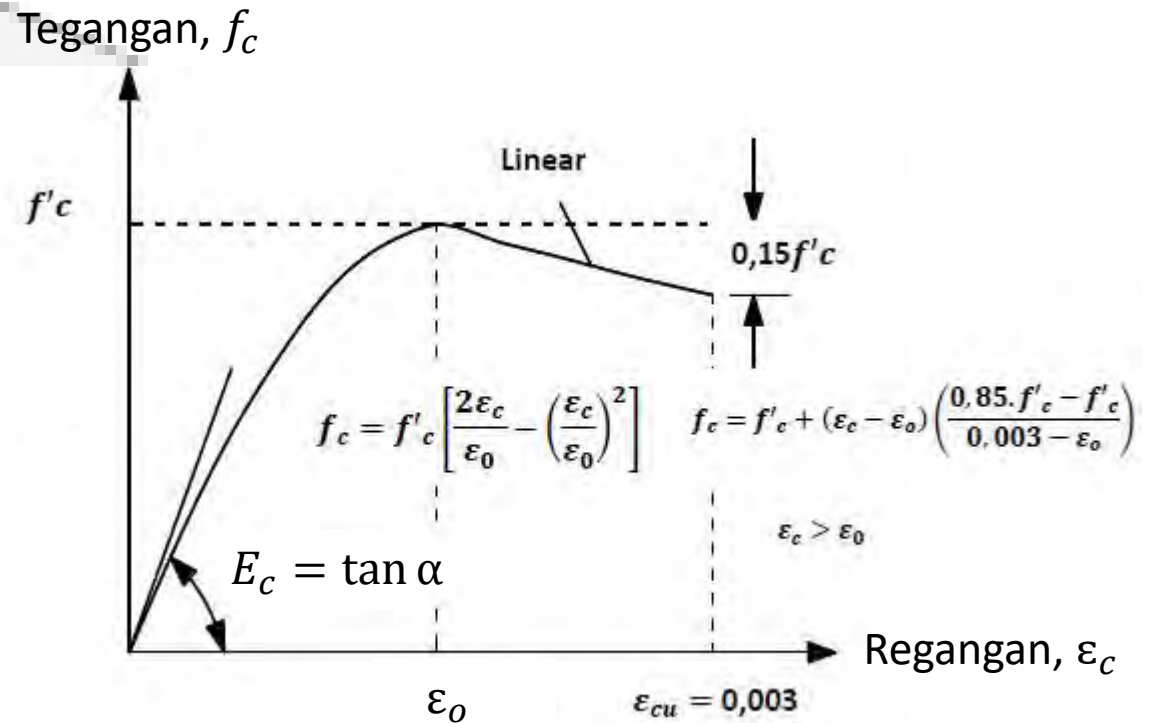
Code: ASTM C469/C469M-14 (2014)

Modulus elastisitas beton (E_c)

- Modulus elastisitas (E_c) adalah kemiringan atau *gradient* dari garis lurus yang ditarik dari kondisi tegangan beton = 0 MPa ke kondisi tegangan = $0,45f'_c$ pada kurva tegangan-regangan beton

(Sumber: Imran dan Zulkifli, 2014)

$$E_c = \tan \alpha$$



Kurva tegangan-regangan beton

- Modulus tangen awal (E_{ct}) yang berkaitan dengan persamaan Hognestad (1951) adalah:

$$E_{ct} = \frac{2f'_c}{\epsilon'_c}; \epsilon'_c = \epsilon_0$$

Regangan beton

Regangan aksial:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L_o} \text{ (mm/mm)}$$

Regangan transversal :

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta T}{D_o} \text{ (mm/mm)}$$

dengan:

ΔL : deformasi aksial spesimen

L_o : jarak vertikal antara dua cincin yang terpasang atau *gauge length*

ΔT : deformasi transversal di tengah tinggi spesimen

D_o : diameter awal silinder

Modulus elastisitas hasil pengujian

Modulus elastisitas statik beton

$$E_c = \frac{(f_{c2} - f_{c1})}{\varepsilon_{c2} - 0,000050} \text{ (MPa)}$$

dengan:

f_{c1} : tegangan beton saat regangan elastik sebesar 50×10^{-6} (MPa)

f_{c2} : tegangan beton saat mencapai 40% tegangan puncak (MPa)

ε_{c2} : regangan tekan aksial pada saat tegangan beton mencapai f_{c2}

ILMU ALAT PENGABDIAN

Poisson's Ratio (ν)

- Nilai *Poisson's ratio* diperoleh dari pengujian sampel silinder beton.
- Untuk beton normal, nilai *Poisson's ratio* adalah berkisar dari 0,15 – 0,20 (Park dan Paulay (1975))
- Untuk beton mutu tinggi, nilai *Poisson's ratio* adalah 0,20 (ACI 363R (2010)) atau berkisar dari 0,22-0,24 (Dugat, dkk., 1996)

Nilai Poisson's *ratio*:

$$\nu = \frac{(\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1})}{\varepsilon_{c2} - 0,000050} \text{ (MPa)}$$

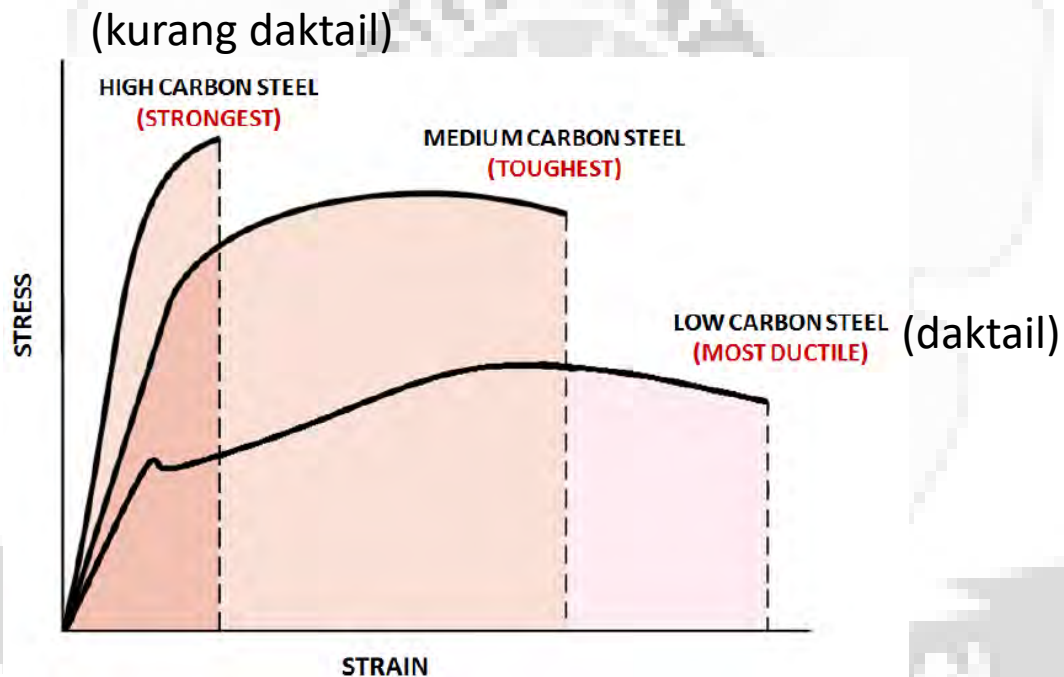
dengan:

ε_{t1} : regangan transversal di tengah spesimen pada saat tegangan beton mencapai f_{c1}

ε_{t2} : regangan transversal di tengah spesimen pada saat tegangan beton mencapai f_{c2}

Material baja tulangan

- Kurva tegangan-regangan baja yang daktail dan kurang daktail

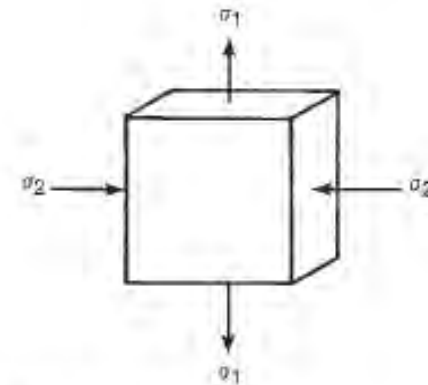


Kurva tegangan-regangan baja tulangan dengan berbagai kandungan *carbon steel*

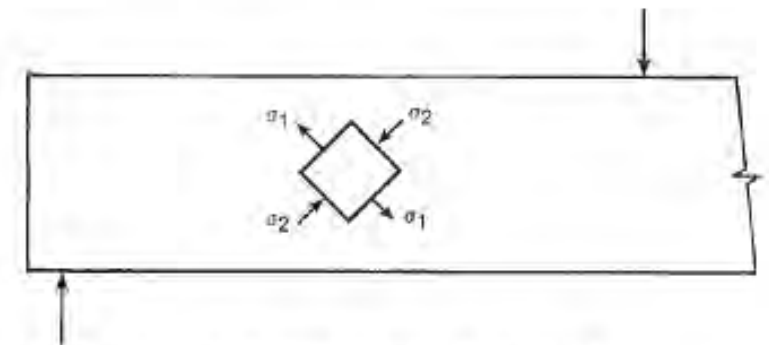
Sumber: Pruthvi Loy dan Ciranth, B.P.

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Beton didefinisikan mengalami **pembebanan biaksial** jika diberi beban pada dua arah (arah ke-1 dan 2) yang saling tegak lurus tanpa terjadi tegangan atau regangan akibat deformasi pada arah ketiga, seperti pada Gambar 3-11a. Contoh umum ditunjukkan pada Gambar. 3-11b.



(a) Biaxial state of stress.



(b) Biaxial state of stress in the web of a beam.

Fig. 3-11
Biaxial stresses.

Sumber: Wight, 2016

Pengertian jenis tegangan

- Tegangan uniaksial: salah satu tegangan, yaitu tegangan utama tarik (σ_2) atau tegangan utama tekan (σ_1) terjadi tidak bersamaan
- Tegangan biaksial: tegangan utama tarik (σ_2) dan tegangan utama tekan (σ_1) terjadi bersamaan
- Tegangan triaksial: tegangan utama tarik (σ_2), tegangan utama tekan (σ_1), dan tegangan yang tegak lurus terhadap σ_1 dan σ_1 (dinamai σ_3) terjadi bersamaan

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Kekuatan dan mode keruntuhan beton yang mengalami tegangan biaksial dapat dinyatakan sebagai fungsi dari kombinasi tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-12. Garis berbentuk buah pir pada Gambar 3-12a mewakili kombinasi dari tegangan biaksial, σ_1 dan σ_2 , yang menyebabkan keretakan atau kegagalan tekan beton. Garis ini melewati kekuatan tekan uniaksial (f'_c) pada A dan A' dan kekuatan tarik uniaksial (f'_t) pada B dan B'.

Di bawah tegangan biaksial (σ_1 adalah tegangan tekan dan σ_2 adalah tegangan tarik) kekuatannya dekat dengan tegangan uniaksial, seperti yang ditunjukkan oleh wilayah B-D-B' (zona 1) pada Gambar 3-12a. Di sini, kegagalan terjadi karena fraktur tarik yang tegak lurus terhadap tegangan tarik utama maksimum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3-12b, yang sesuai dengan titik B pada Gambar. 3-12a.

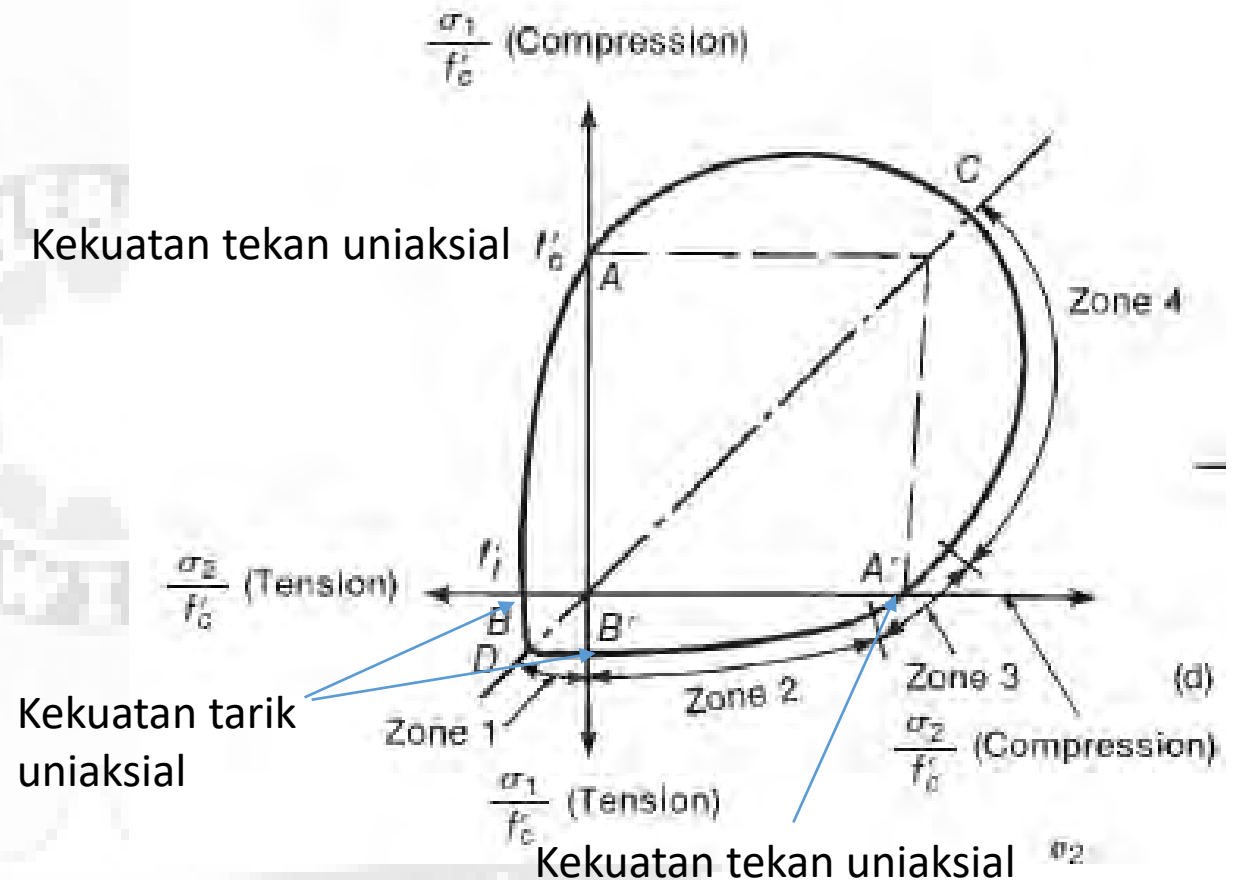


Fig. 3-12a. Tegangan saat runtuh di bawah tegangan biaksial

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Ketika tegangan utama tarik dan tegangan utama tekan terjadi bersamaan (tegangan biaksial), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-11a, maka **beton retak pada tekanan yang lebih rendah daripada jika mengalami tegangan tarik atau tekan uniaksial (hanya σ_1 atau σ_2 yang terjadi)**. Ini ditunjukkan oleh daerah A-B dan A'-B' pada Gambar 3-12a.

Di wilayah ini, zona 2 pada Gambar 3-12a, keruntuhan beton terjadi karena fraktur tarik pada bidang yang tegak lurus terhadap tegangan tarik utama. Kekuatan yang lebih rendah di wilayah ini menunjukkan bahwa **keruntuhan beton lebih dominan akibat pembatasan regangan tarik daripada tegangan tarik**.

Di bawah tekan uniaksial (titik A dan A' dan zona 3 pada Gambar 3-12a), kegagalan dimulai oleh **pembentukan retak tarik pada bidang yang sejajar dengan arah tegangan tekan**, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3-12c. Bidang-bidang ini adalah lokasi regangan tarik utama maksimum.

Di bawah **kompresi biaksial** (wilayah A-C-A dan zona 4 pada Gambar 3-12a), pola keruntuhan beton berubah menjadi **serangkaian permukaan fraktur paralel pada bidang yang sejajar dengan sisi-sisi yang tidak dibebani**, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-12d. Bidang-bidang tersebut diakibatkan oleh regangan tarik maksimum.

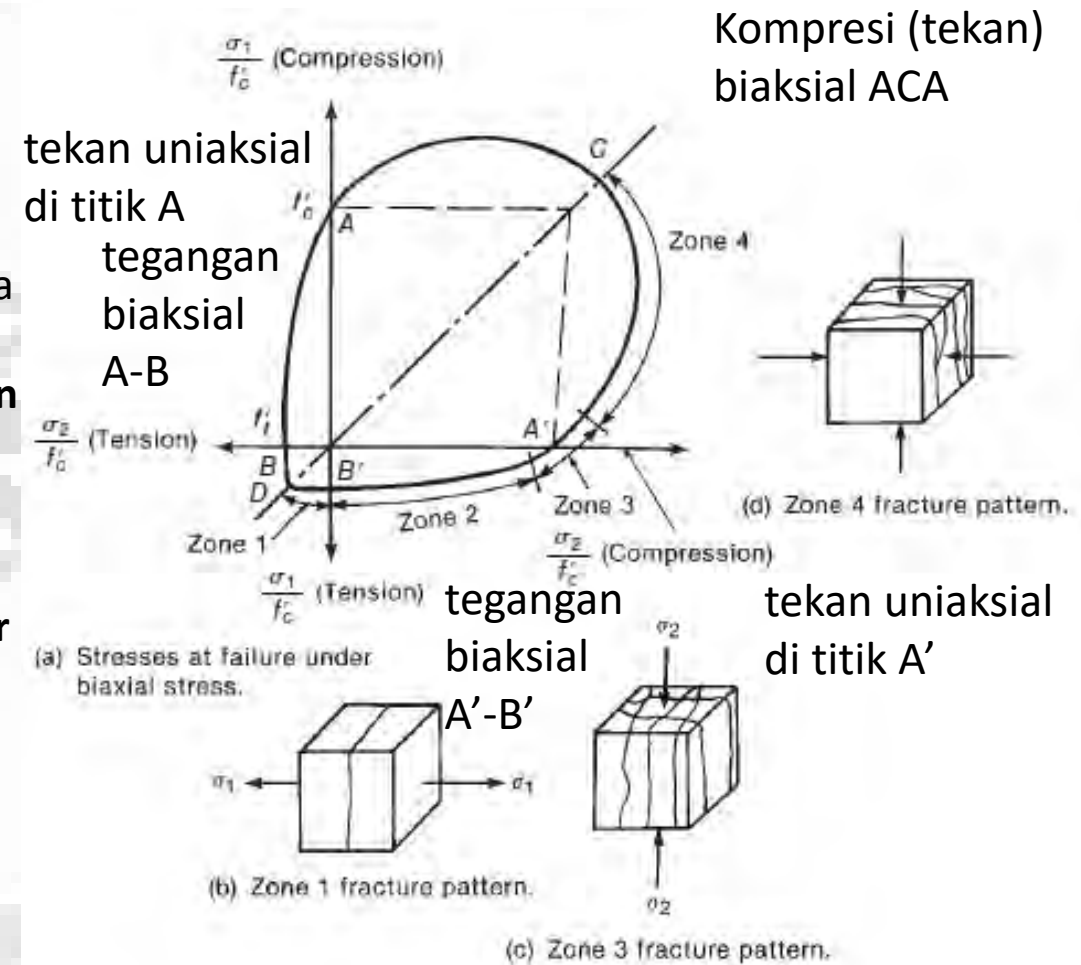


Fig. 3-12
Strength and modes of failure
of unreinforced concrete
subjected to biaxial stresses.

Sumber: Wight, 2016

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Beban tekan biaksial (dari dua arah yang saling tegak lurus) dan triaksial (dari tiga arah yang saling tegak lurus) memperlambat pembentukan retak ikatan (*bond*) dan retak mortar. Akibatnya, periode perambatan retak stabil lebih lama dan beton lebih daktail.

Pada Gambar. 3-12, **kekuatan beton di bawah beban tekan biaksial (σ_1 dan σ_2 terjadi bersamaan) lebih besar dari kekuatan tekan uniaksial (hanya σ_1 atau σ_2 yang terjadi).** Di bawah tegangan tekan biaksial yang sama, kekuatannya sekitar 107 % dari f'_c , seperti yang ditunjukkan oleh titik C.

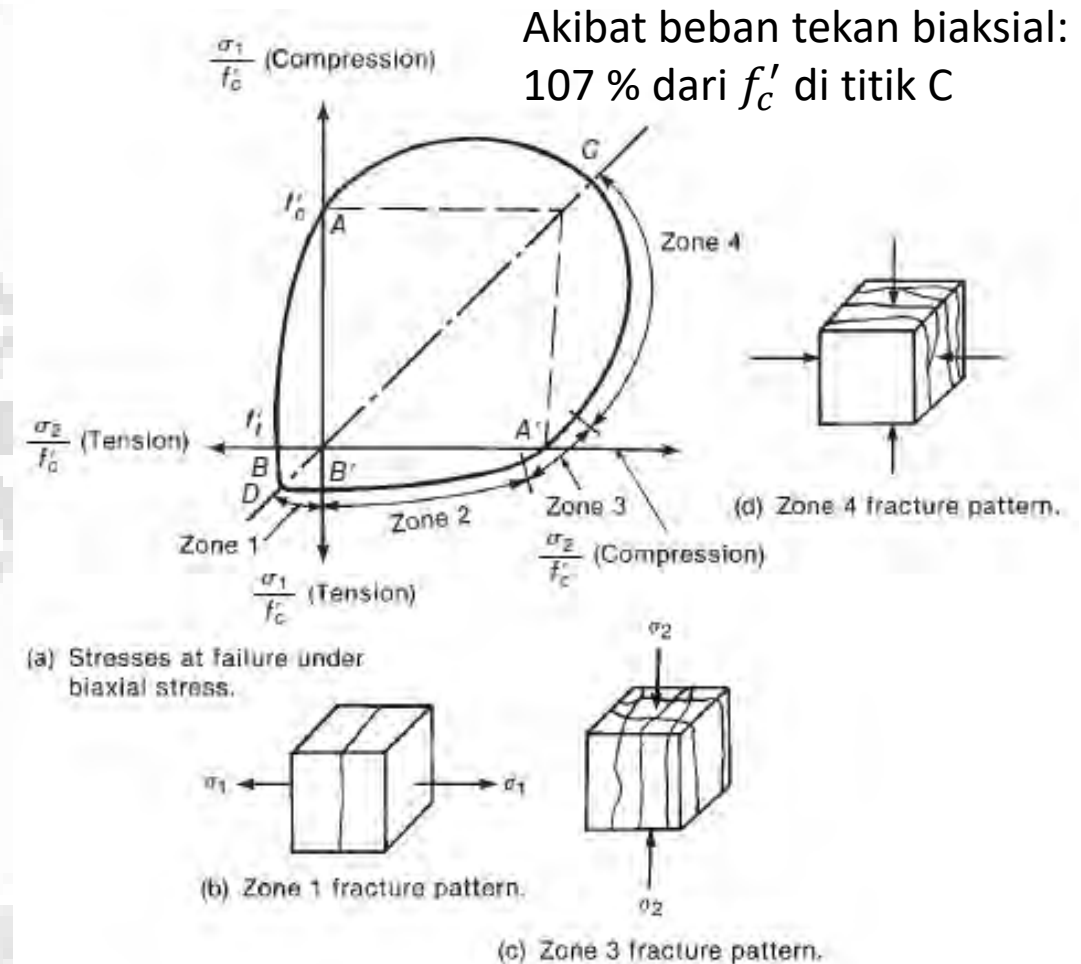
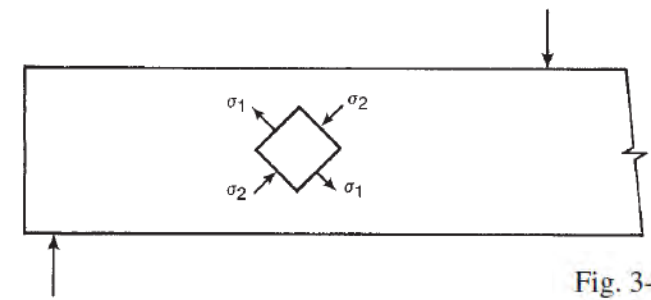


Fig. 3-12
Strength and modes of failure
of unreinforced concrete
subjected to biaxial stresses.

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

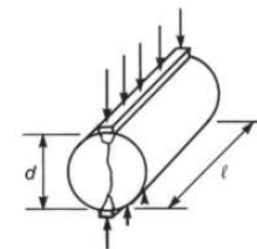
Pada balok, tegangan tarik dan tekan utama mengarah ke keadaan tarik-tekan tegangan biaksial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-11b. Di bawah pembebanan seperti itu, **kekuatan tarik dan tekan lebih kecil daripada di bawah tekanan uniaksial**, seperti yang ditunjukkan oleh **kuadran AB atau A'B' (tekan biaksial)** pada Gambar 3-12a.

Keadaan tegangan biaksial serupa juga terjadi pada uji belah (*split*) silinder, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3-9c. Ini menjelaskan penyebab kekuatan tarik belah lebih kecil daripada kekuatan tarik lentur.

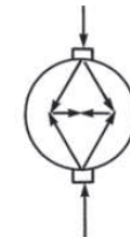


(b) Biaxial state of stress in the web of a beam.

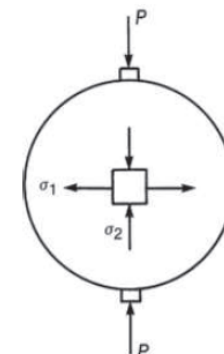
Fig. 3-11
Biaxial stresses.



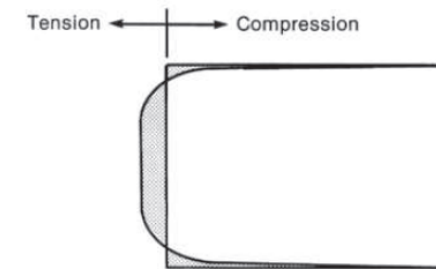
(a) Test procedure.



(b) Simplified force system.



(c) Stresses on element.



(d) Distribution of σ_1 on vertical diameter.

Fig. 3-9
Split-cylinder test.

Sumber: Wight, 2016

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Di zona 1 dan 2 di Gambar 3-12, keruntuhan terjadi ketika beton retak (akibat gaya tarik); dan di zona 3 dan 4, keruntuhan terjadi ketika beton hancur (akibat gaya tekan). Pada bagian beton bertulang dengan **tulangan yang cukup dan sejajar dengan tegangan tarik**, retak tidak mewakili kegagalan elemen (balok/kolom/pelat/*pile cap*, dsb.) karena tulangan menahan gaya tarik setelah retak.

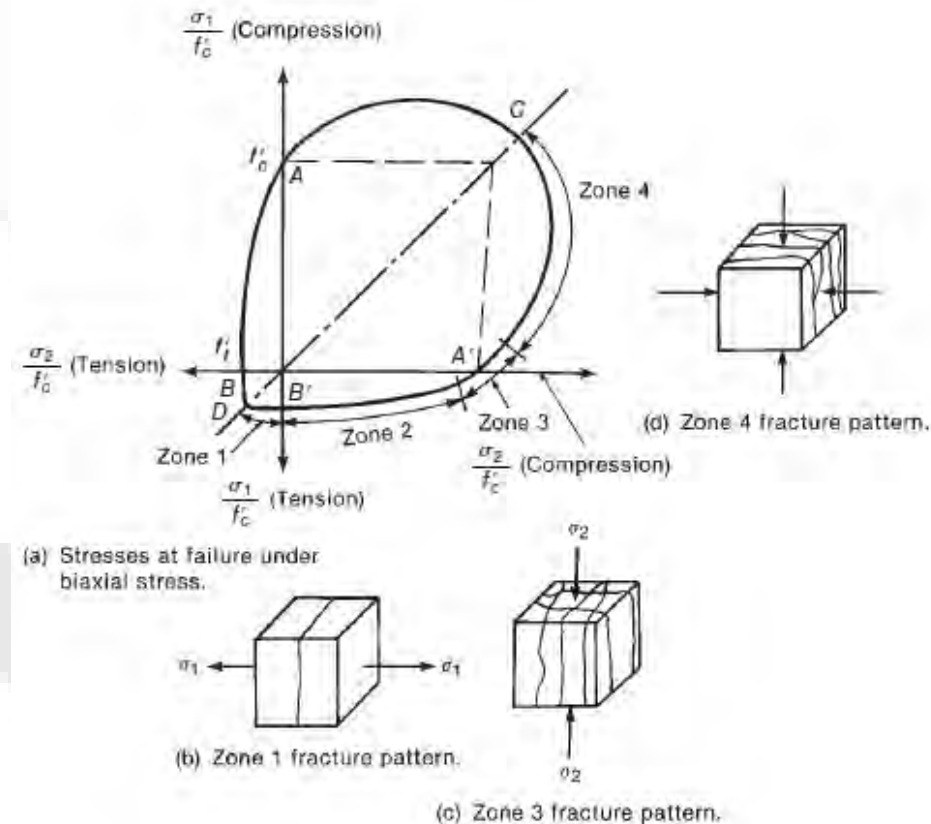


Fig. 3-12
Strength and modes of failure
of unreinforced concrete
subjected to biaxial stresses.

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Beban biaksial (dari dua arah yang saling tegak lurus menghasilkan kurva hubungan tegangan-regangan mirip buah pir, yang terdiri dari daerah:

- *Compression* (tekan)
- *Tension* (tarik)

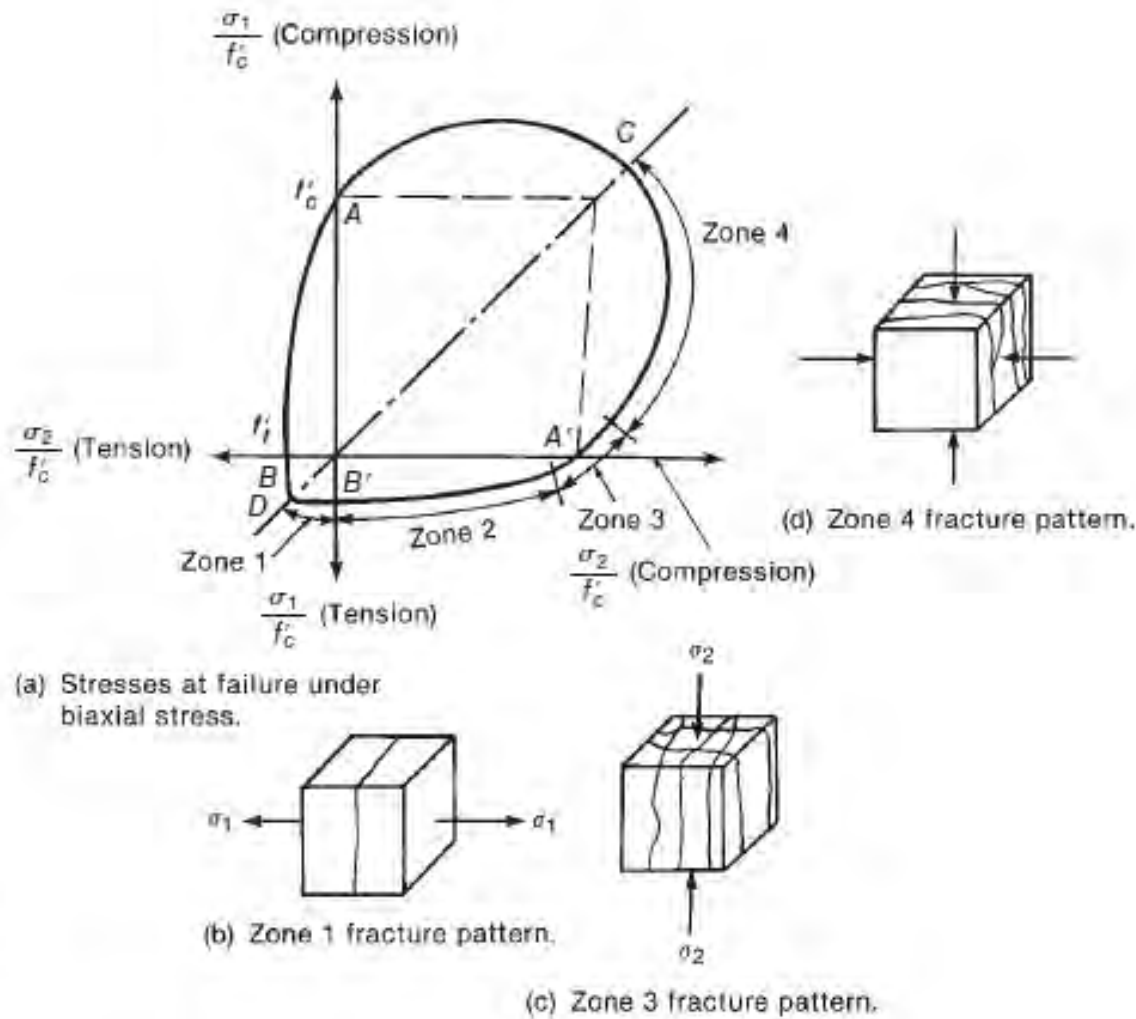


Fig. 3-12
Strength and modes of failure of unreinforced concrete subjected to biaxial stresses. (From [3-30].)

Sumber: Wight, 2016

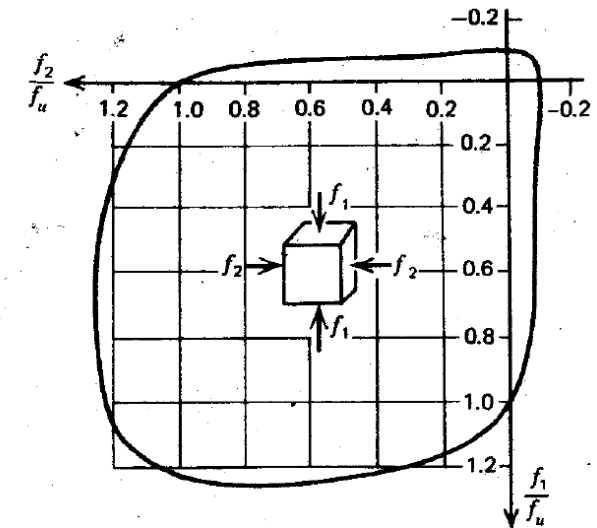


Fig. 2.8. Biaxial strength of concrete, f_u = uniaxial strength.^{2,10}

Sumber: Park dan Paulay, 1975

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

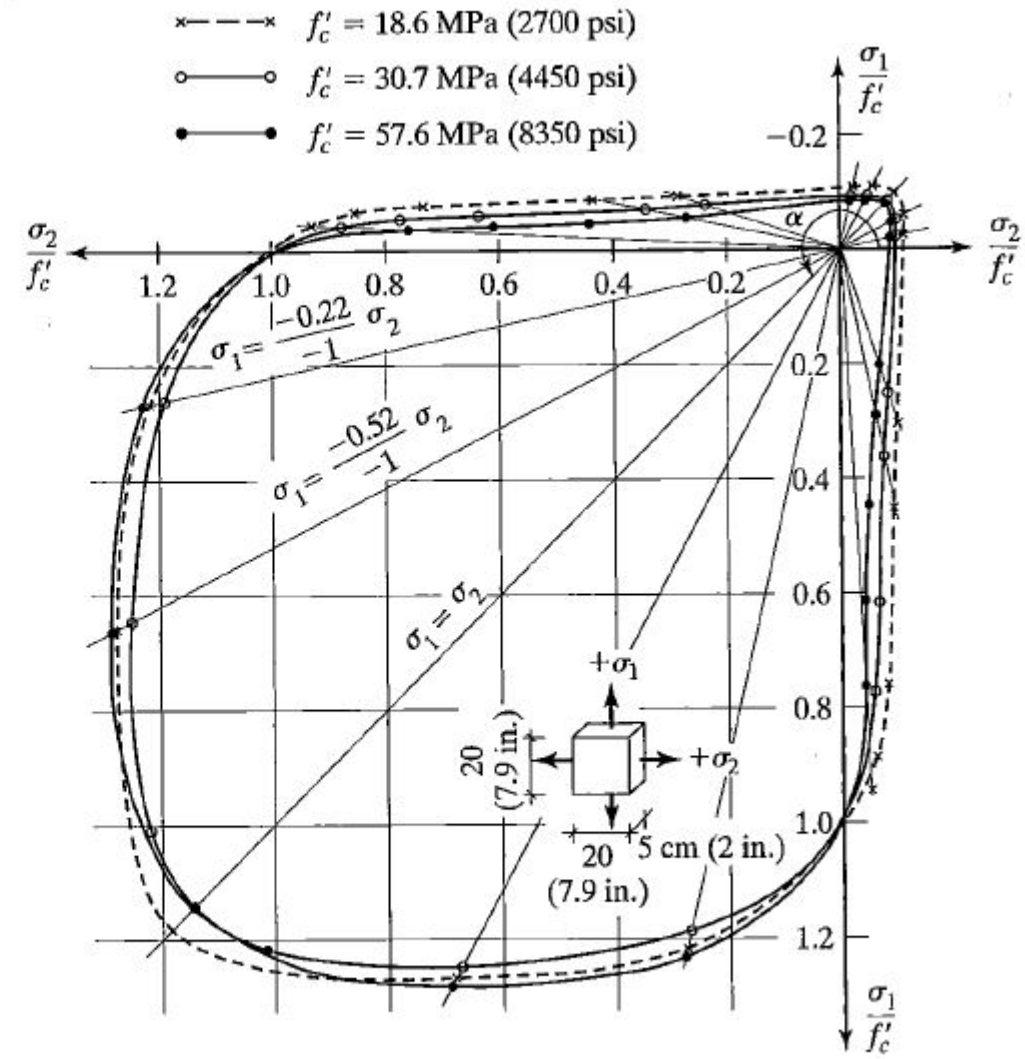


FIGURE 13.38
 Biaxial strength of concrete. [Adapted from H. Kupfer, H. K. Hilsdorf, and H. Rusch, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 66, No. 8, pp. 656-666 (1969).]

Pembebanan biaksial pada beton tanpa baja tulangan dan tidak retak

Kekuatan tekan (f_3) beton di bawah keadaan tekan-tarik biaksial berkurang ketika tegangan tarik di arah lain meningkat. Demikian pula, kekuatan tarik (f_1) berkurang ketika tegangan tekan meningkat. Oleh karena itu, kekuatan tarik / tekan biaksial beton di bawah rasio tegangan (f_1/f_3) lebih rendah dari kekuatan uniaksial yang sesuai. Kurva tegangan-regangan beton di bawah keadaan tarik-tekan biaksial ditunjukkan pada Gambar 5-5 (a), dan nilai regangan dan kelengkungan kurva masing-masing mirip dengan yang di bawah tegangan uniaksial. Sebagian besar spesimen rusak dengan berupa sedikit deformasi plastis pada keruntuhan beton.

Sumber: Guo (2014)

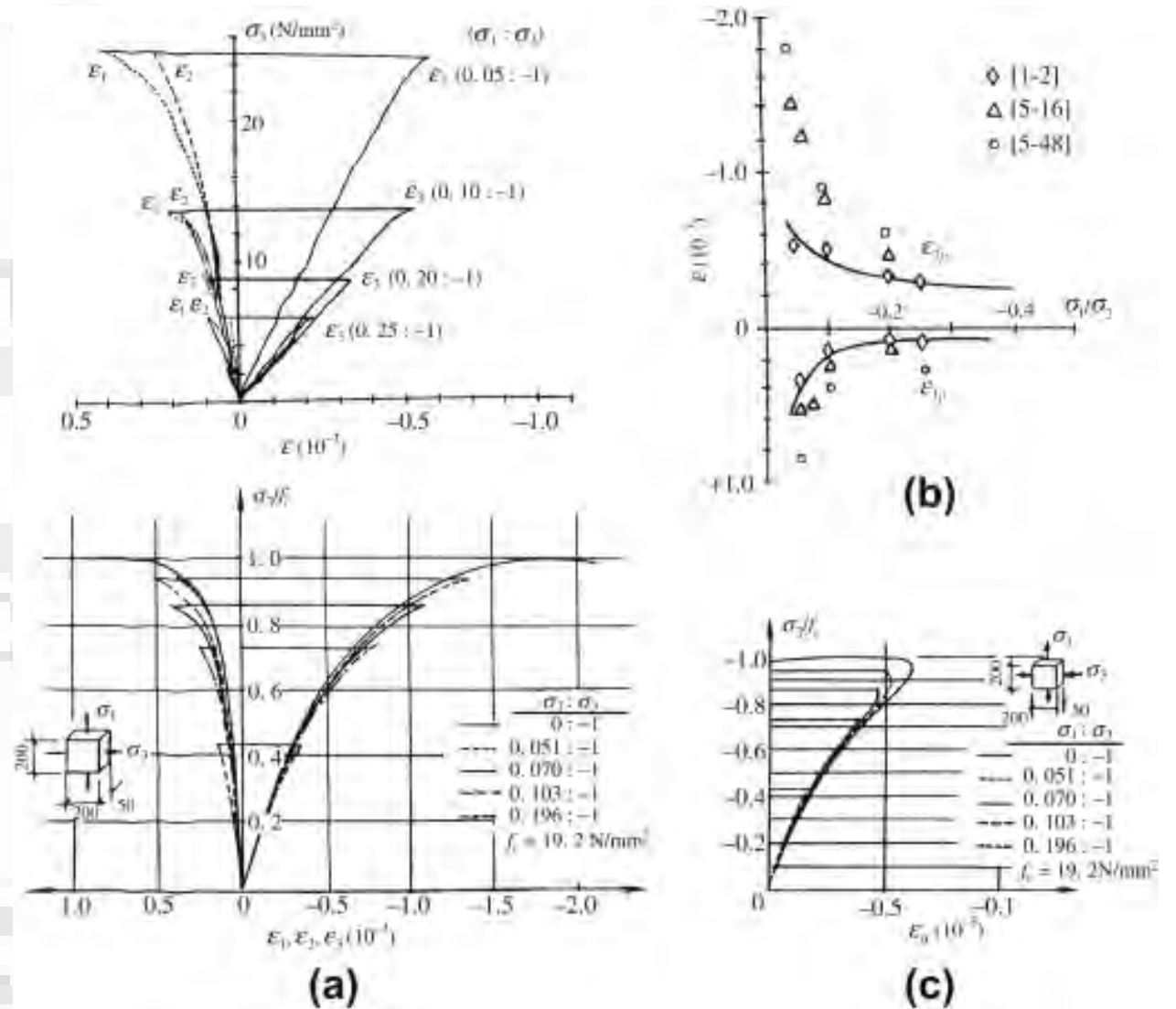


FIG. 5-5. Deformation of concrete under biaxial tension/compression [1-2]: (a) stress-strain curve, (b) peak strain, (c) volumetric strain

Perilaku beton terhadap beban tekan triaksial

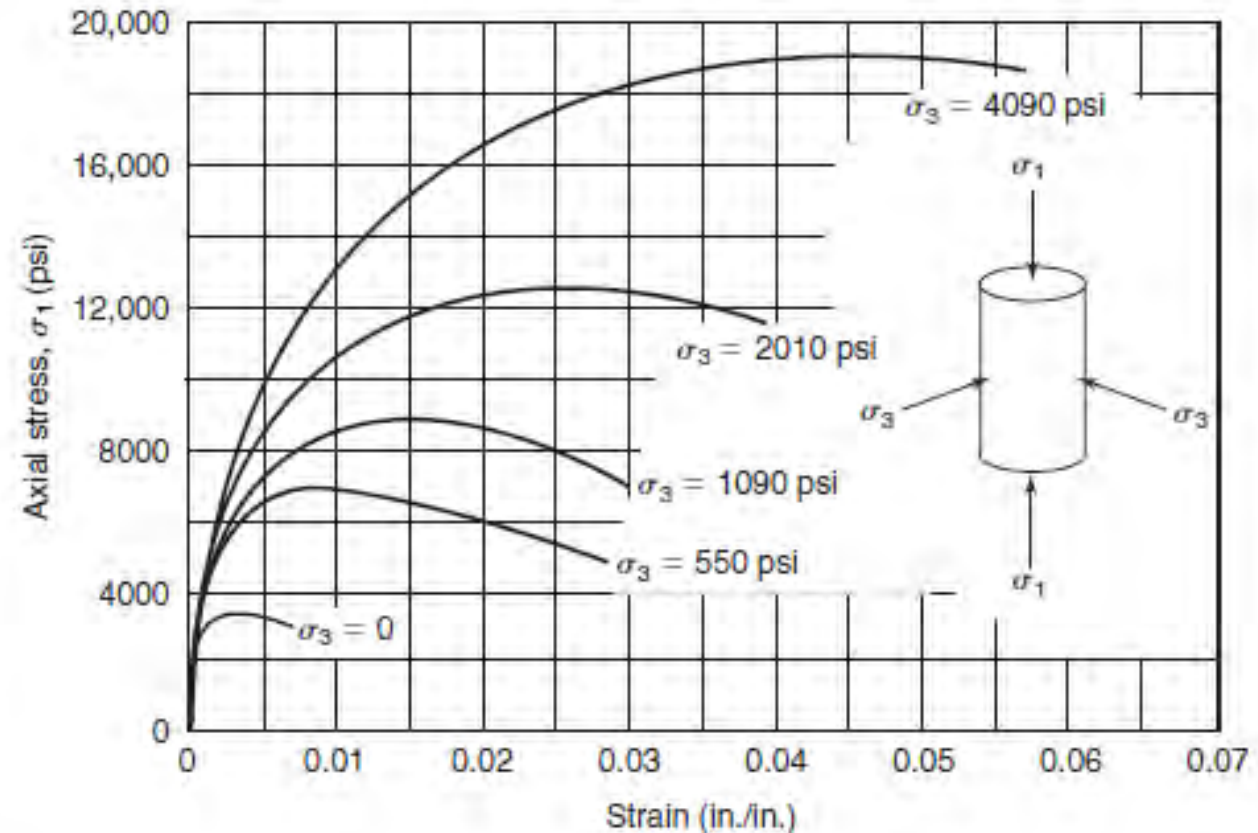
Beban aksial searah tegangan σ_1 menyebabkan munculnya tegangan pada material, yaitu σ_1 dan σ_2 yang saling tegak lurus (lihat halaman 29).

Beban lain dari arah lateral adalah σ_3 .

Di bawah tegangan tekan triaksial (3 arah yang saling tegak lurus), mode keruntuhan beton melibatkan fraktur tarik paralel dengan tegangan tekan maksimum (dan dengan demikian ortogonal terhadap regangan tarik maksimum, jika ada) atau mode keruntuhan geser. Kekuatan dan daktilitas beton di bawah tekan triaksial melebihi yang di bawah tekan uniaksial (Gambar. 3-15).

Fig. 3-15
Axial stress-strain curves from triaxial compression tests on concrete cylinders; unconfined compressive strength $f'_c = 3600$ psi. (From [3-3].)

Sumber: Wight, 2016

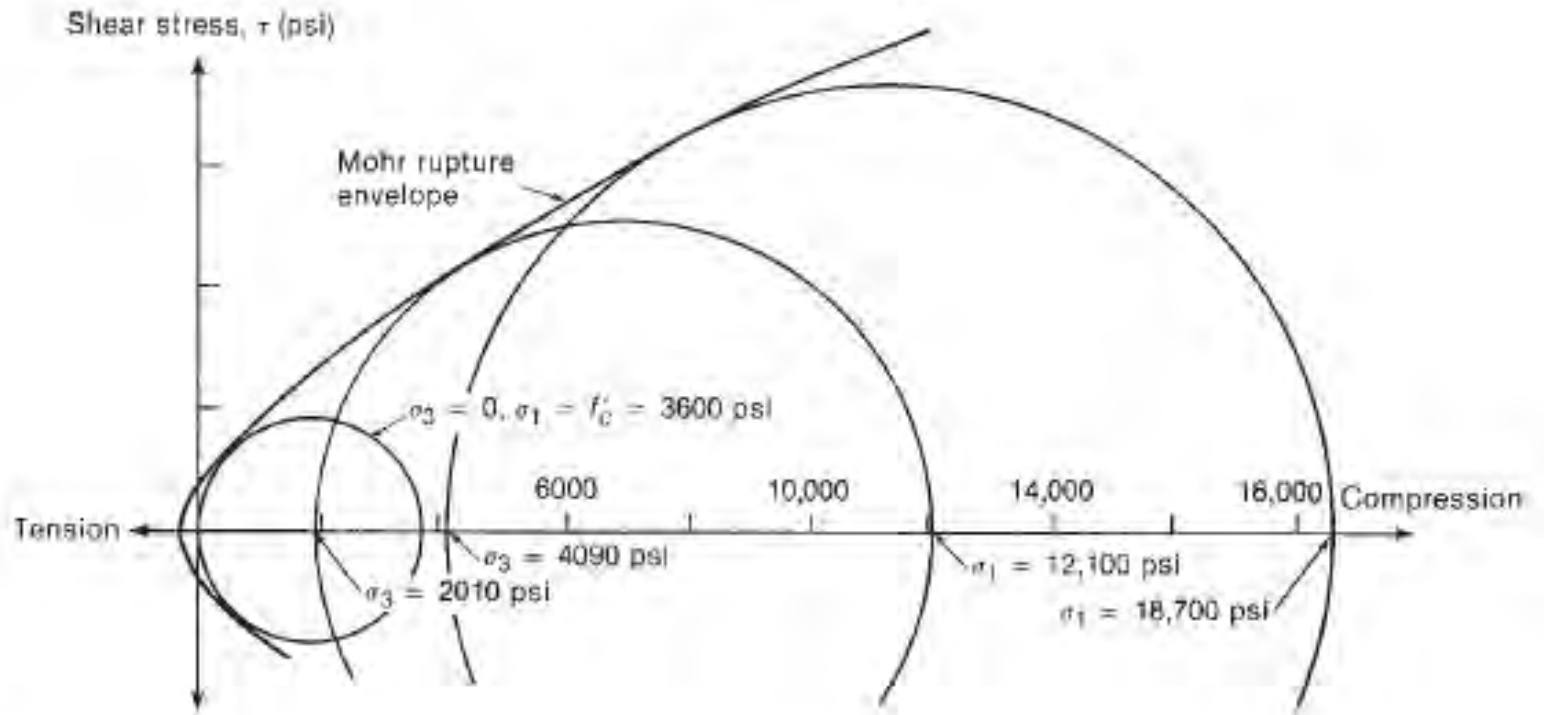


Perilaku Beton terhadap Tekan Triaksial

Kurva tegangan-regangan longitudinal setiap silinder yang mengalami tekanan fluida lateral konstan ($\sigma_2 = \sigma_3$), sedangkan tegangan longitudinal (σ_1) meningkat menjadi keruntuhan beton. Tes ini menunjukkan bahwa tegangan longitudinal pada keruntuhan beton adalah:

$$\sigma_1 = f'_c + 4,1\sigma_3$$

Fig. 3-16
Mohr rupture envelope for
concrete tests from Fig. 3-15.



Sumber: Wight, 2016

ILMU ALAT PENGABDIAN

Kekuatan tekan beton bertulang yang retak

Gambar 3-13a menunjukkan elemen beton yang telah retak oleh tegangan tarik horisontal.

Tegangan tekan yang bekerja di atas bagian yang diarsir diseimbangkan oleh tegangan tekan dan mungkin beberapa tegangan *bearing* (bantalan) di bagian bawah dan tegangan geser di sepanjang tepian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3-13b.

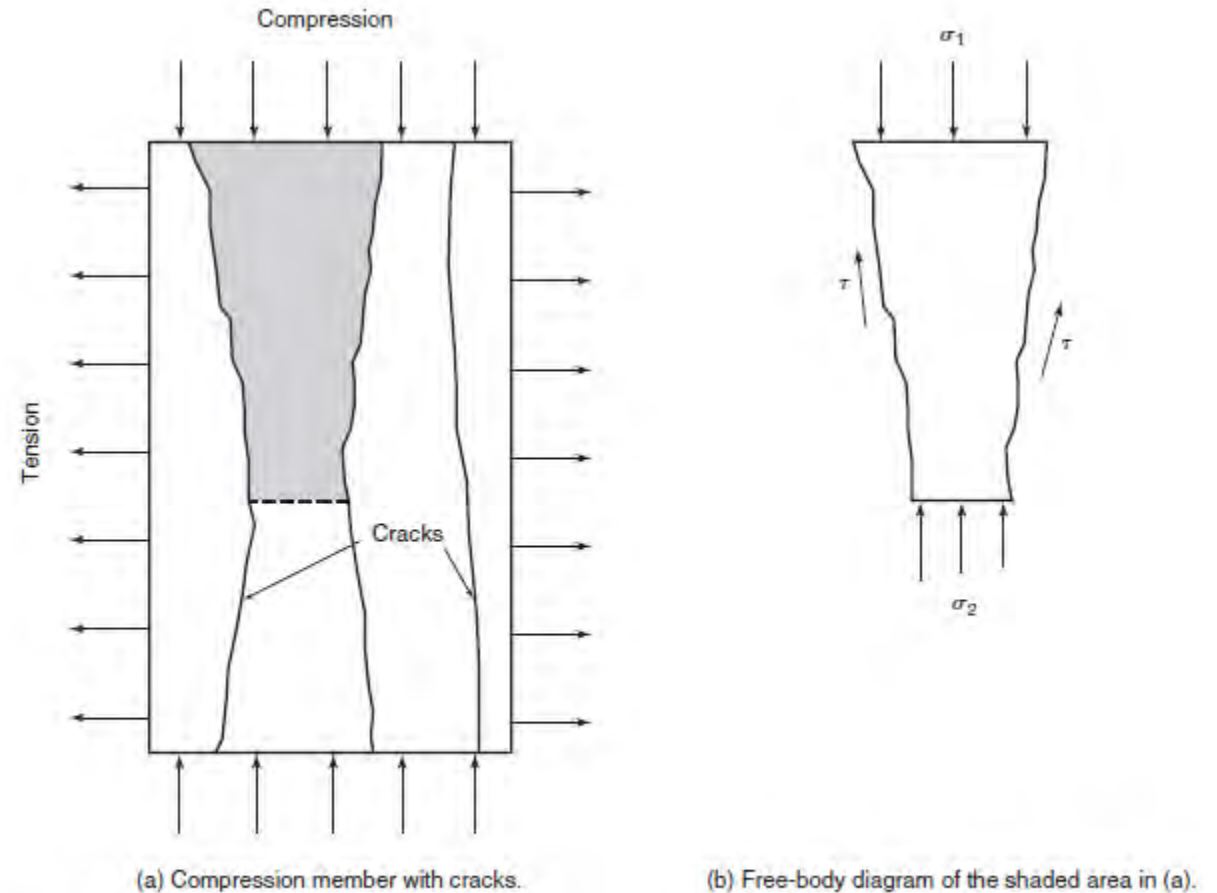


Fig. 3-13
Stresses in a biaxially loaded, cracked-concrete panel with cracks parallel to the direction of the principal compression stress.

Sumber: Wight, 2016

Susut-kering dan regangan-rangkak (*Drying-shrinkage and creep-strain*)

Faktor penyebab susut-kering dan rangkak:

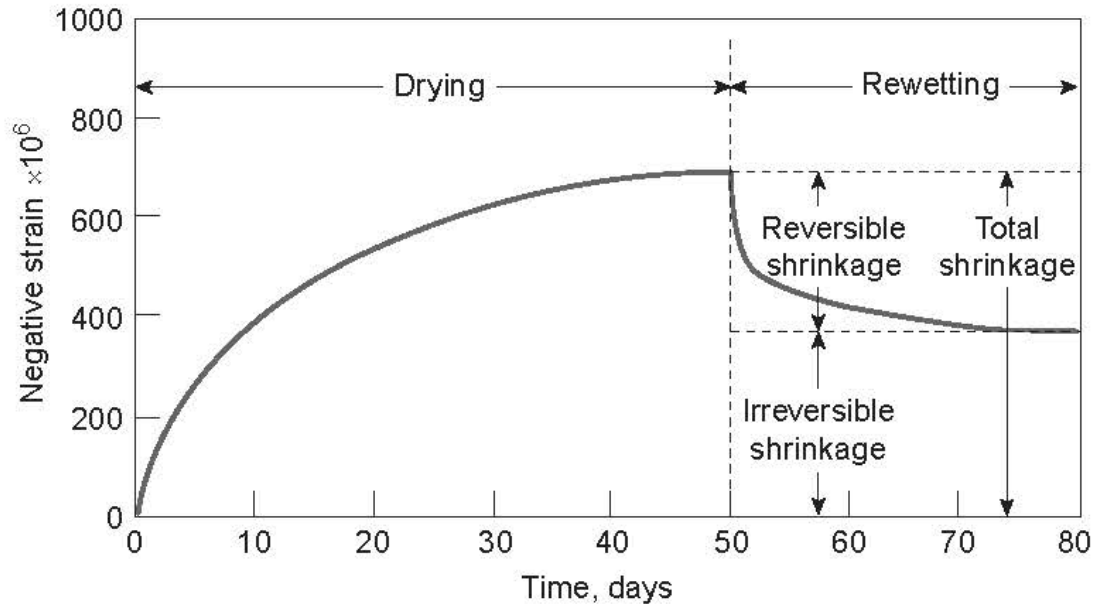
- ❖ Pasta semen yang jenuh kadar air memiliki dimensi yang tidak stabil ketika terkena kelembaban lingkungan (*ambient humidities*) yang berada di bawah kadar jenuh air, terutama karena **hilangnya air yang diadsorpsi** menyebabkan terjadinya regangan susut. Dalam hal ini, salah satu komponen *mix-design* beton, yaitu kadar air terhadap semen (***W/C ratio***) mempengaruhi besarnya **susut-kering** dan pengurangan dimensi.
- ❖ Saat pasta semen terhidrasi **menahan tegangan**, tergantung pada besar dan durasi tegangan, maka *calcium silicate hydrate* (C-S-H) akan kehilangan sejumlah besar air yang teradsorpsi secara fisik, tergantung pada besarnya dan durasi tegangan dari beban, dan pada pasta semen akan muncul **regangan-rangkak**.
- ❖ Dari dua poin di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa penyebab awal susut-kering dan regangan-rangkak secara umum adalah sama, yaitu **proses hidrasi pasta semen**. Selanjutnya:
 - Susut-kering disebabkan oleh kelembaban relatif yang berbeda pada beton dan lingkungan.
 - Regangan-rangkak disebabkan oleh tegangan akibat pembebanan yang terus-menerus pada beton.

Catatan:

Calcium silicate hydrates (C-S-H) terbentuk selama proses hidrasi semen Portland dan memiliki sifat *adhesive* (perekat).

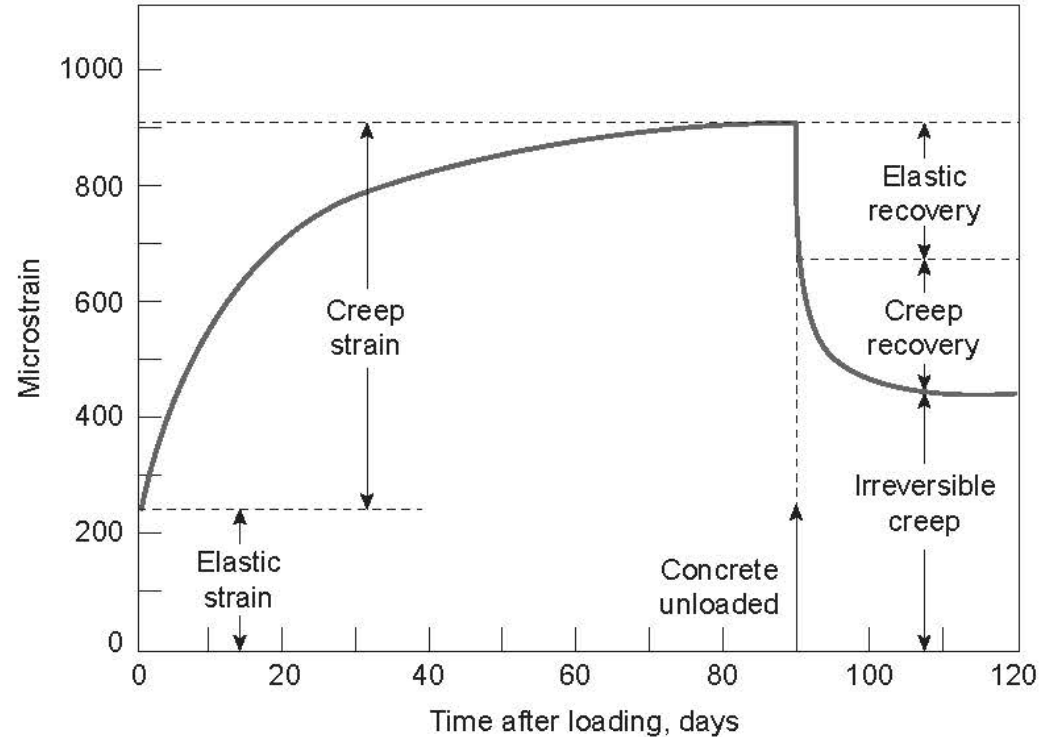
Sumber: Mehta dan Monteiro (2006)

Susut-kering dan regangan-rangkak (*Drying-shrinkage and creep-strain*)



Kurva hubungan regangan susut-kering terhadap waktu yang bersifat *reversible drying-rewetting*

Sumber: Mehta dan Monteiro (2006), dari Mindess, S. dan J.F. Young, *Concrete*, 1981, pp.286, 501



Kurva hubungan regangan-rangkak terhadap waktu yang bersifat *reversible loading-unloading*

- Regangan mikro akibat susut-kering dan rangkak = 400 hingga 1000×10^{-6} (cukup signifikan sehingga tidak dapat diabaikan dalam desain struktur)
- Susut-kering dan rangkak bersifat berbalik (*reversible*)
- Terjadi **retak mikro** akibat susut-kering pada *interfacial transition zone* beton

Susut akibat perubahan suhu lingkungan (*Thermal shrinkage*)

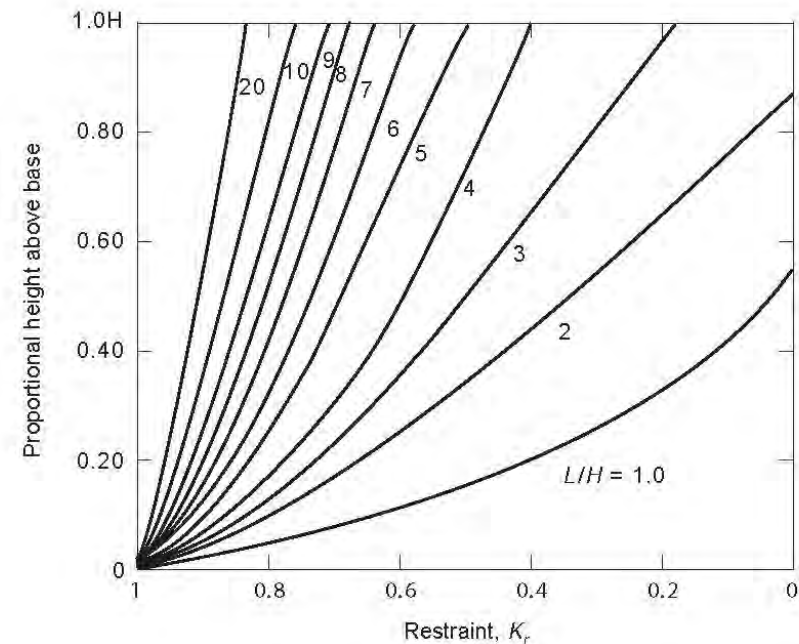
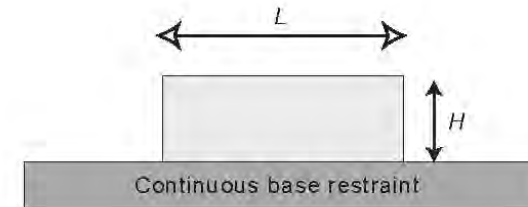
- ❖ Secara umum, zat padat memuai akibat pemanasan dan menyusut akibat pendinginan. Regangan yang dipengaruhi oleh suhu, tergantung pada koefisien perluasan termal material (*coefficient of thermal expansion*) dan besarnya penurunan atau kenaikan suhu. Kondisi ini menyebabkan terjadinya **tegangan thermal**.
- ❖ Umumnya, struktur beton biasa hanya sedikit terpengaruh oleh perubahan suhu sekitar, kecuali dalam kondisi iklim ekstrim. Namun, pada struktur beton besar, kombinasi panas yang dihasilkan oleh **hidrasi semen** dan kondisi **penyerapan panas dari lingkungan** yang relatif buruk menghasilkan kenaikan suhu beton yang besar dalam beberapa hari setelah penempatan. Selanjutnya, pendinginan suhu lingkungan sekitar sering menyebabkan beton **retak**.
- ❖ Karena perhatian utama dalam desain dan konstruksi struktur beton massal adalah struktur yang tetap monolit dan bebas retakan, maka diperlukan upaya untuk mengontrol kenaikan suhu melalui pemilihan bahan yang tepat, proporsi campuran, kondisi perawatan (*curing*), dan praktek konstruksi (Mehta dan Monteiro, 2006).

Susut akibat perubahan suhu lingkungan (*Thermal shrinkage*)

Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan thermal:

- Derajat perletakan (*restraint*) (K_r).

Asumsikan sebuah fondasi yang kaku, terdapat pengekangan penuh pada antarmuka beton-agregat ($K_r = 1,0$), namun karena jarak dari antarmuka meningkat, maka pengekangan akan menurun.



Derajat perletakan tarik pada penampang tengah

[Sumber: ACI Committee 207, Cooling Mass Concrete, 1998 dan Mehta dan Monteiro (2006)]

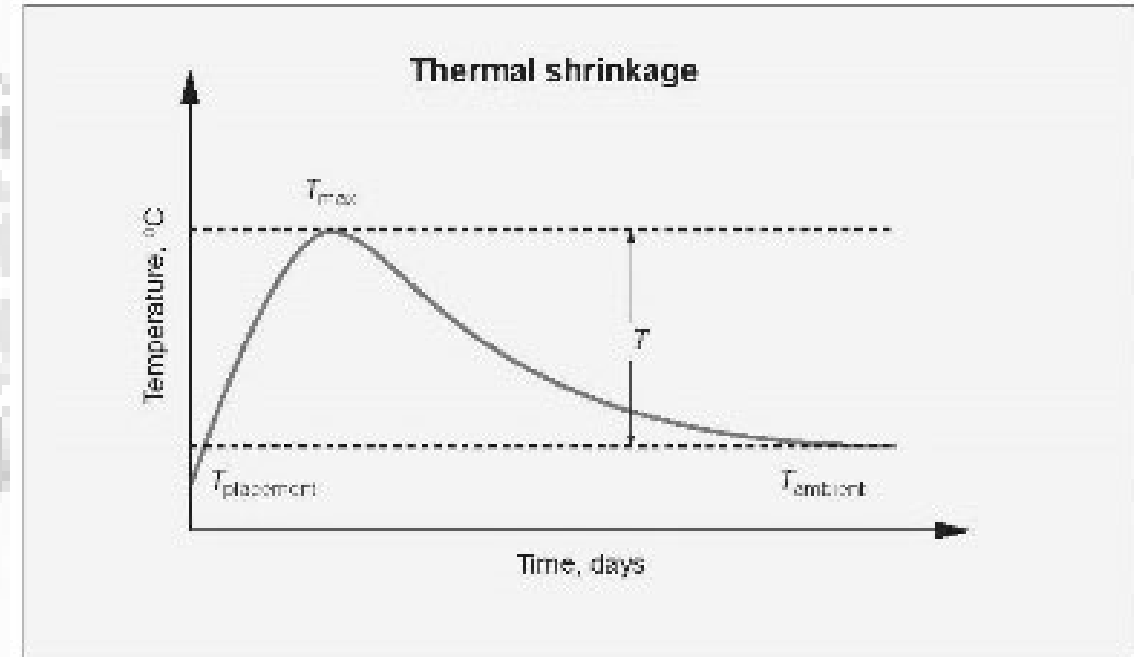
Susut akibat perubahan suhu lingkungan (*Thermal shrinkage*)

Faktor-faktor yang mempengaruhi tegangan thermal:

- Perubahan suhu atau temperatur (ΔT).

Hidrasi senyawa semen menghasilkan panas dan meningkatkan suhu beton. Pemanasan dari lingkungan (*ambient*) menyebabkan ekspansi, dan ekspansi yang dibatasi oleh perletakan (*restraint*) akan menghasilkan tegangan tekan. Namun, pada umur awal (*early age*) beton, modulus elastisitas beton rendah dan relaksasi tegangan tinggi, maka tegangan tekan rendah, bahkan pada area penuh perletakan.

Dalam desain yang konservatif, diasumsikan tidak ada kompresi awal. Perubahan suhu (ΔT) adalah perbedaan antara suhu puncak beton dan suhu layanan struktur.



Temperatur berubah sesuai waktu

Sumber: Mehta dan Monteiro (2006)



Referensi

- ACI Committee 318, (2014): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 318, (2019): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 363R, (2010): *Report on High Strength Concrete (ACI 363R-10) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2019): *SNI 2847:2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Dugat, J. Roux, N., dan Bernier, G., (1996): *Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes*, *Material and Structures*, Vol. 29, May, pp. 233-240.
- Frank J. Vecchio dan Michael P. Collins, *The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses*, Publication 82-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, March 1982, 332 pp.
- Gedney, R. (2010). <http://info.admet.com/videos/bid/40246/How-to-Perform-an-ASTM-C469-Concrete-Compression-Test>. Diunduh pada tanggal 15 Februari 2014.
- Guo, Z., (2014): *Multiaxial Strength and Constitutive Relation*, *Principles of Reinforced Concrete*, ScienceDirect.
- Imran, I. dan Zulkifli, E., (2014): *Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Imran, I. dan Hendrik, F., (2014): *Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H., (1969): "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", *American Concrete Institute Journal, Proceedings* Vol. 66, no. 8, August 1969, pp. 656-666.
- Mehta, P. K. dan Monteiro, P. J. M., (2006): *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd edition, Mc-Graw Hill, USA.
- Nawy, E. G., (2009): *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*, 6th edition, Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Nurjannah, S.A., (2016): *Perilaku Histeretik Sub-assembly Balok-Kolom Reactive Powder Concrete Pra-tegang Parsial*, disertasi Program Doktor, Program Pascasarjana, Teknik Sipil, Institut teknologi Bandung, Bandung.
- Park, R. dan Paulay, T., (1975): *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.
- Paulay, T. dan Priestly, M.J.N, (1992): *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Willey & Sons.
- Wight, J. K., (2016): *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 7th ed., Pearson Education, Inc., New Jersey.



TKS 330118

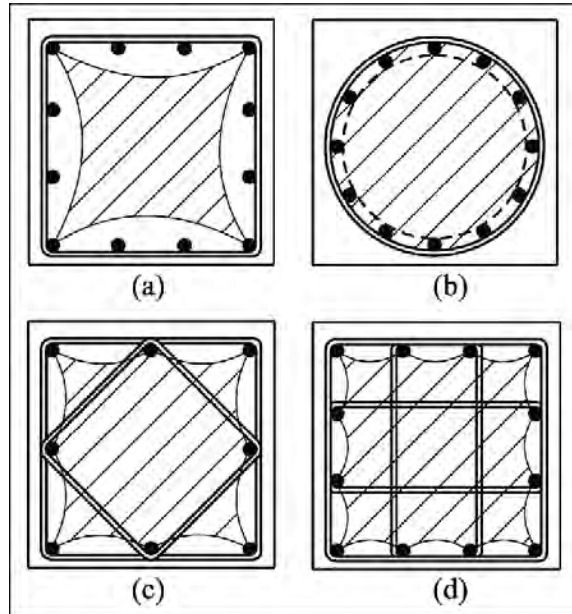
Perilaku dan Desain Struktur Beton Lanjut

Program Magister Teknik Sipil, Rekayasa Struktur
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Available on: <http://bit.ly/S2StrukturBetonLanjut>

Bagian beton yang dikekang (*confined*) oleh tulangan sengkang



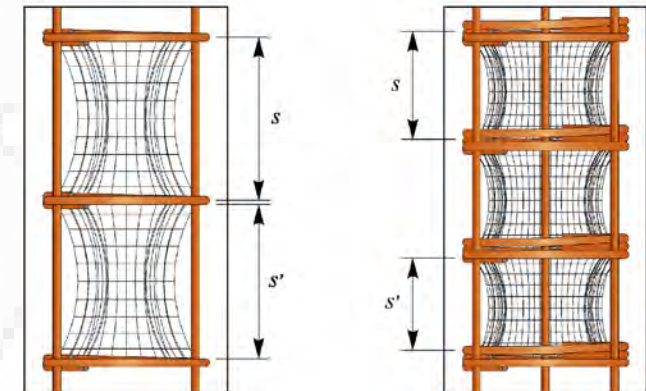
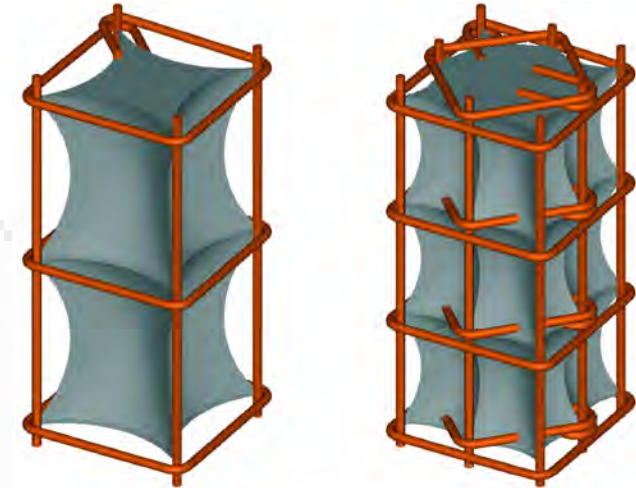
Daerah terkekang efektif inti beton

Sumber: Wu, dkk, 2018; diadaptasi dari Mander, dkk., 1988

Fungsi pengekang beton:
meningkatkan daktilitas

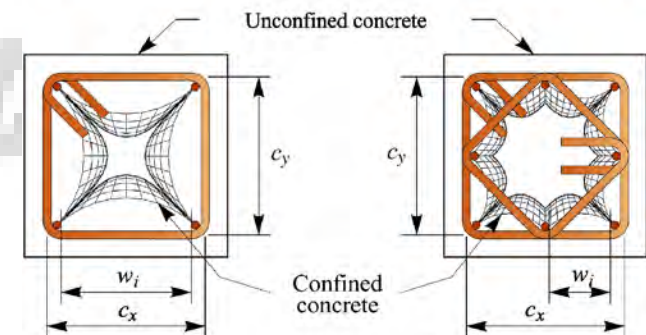
beton, karena:

- beton bersifat getas
- kapasitas deformasi rendah dalam kondisi inelastik



Volume terkekang efektif inti beton

Sumber: Paultre dan Légeron, 2008



Kegagalan **beton** yang tidak/kurang terkekang



Kerusakan pada kolom Olive View Hospital akibat detail tulangan seismik (sengkang pengekan beton) kurang; gempa San Fernando Earthquake 1971.

Image credit: EIS-Steinbrugge



Detil kolom dengan sengkang baja spiral (pengekang beton). Sengkang tersebut mempertahankan keutuhan inti beton. Tulangan longitudinal terikat di bagian luar sengkang spiral, sehingga rentan rusak. *Image credit: EIS-Steinbrugge*



Olive View Hospital, gempa San Fernando tahun 1971. Tampak jarak dekat bagian atas kolom memperlihatkan beton di daerah kritis telah terganggu (pecah) akibat ujung tulangan sengkang spiral (pengekang beton) yang berhenti sebelum mencapai ujung kolom. *Image credit: EIS-Godden*



Tampak jarak dekat kegagalan di ujung bawah kolom bangunan Imperial County Services. Kegagalan terjadi pada zona kolom yang tidak memiliki tulangan sengkang (pengekang beton) yang cukup dan tidak ada tulangan geser.

Image credit: EIS-Steinbrugge

Kegagalan **struktur** akibat beton yang tidak/kurang terkekang



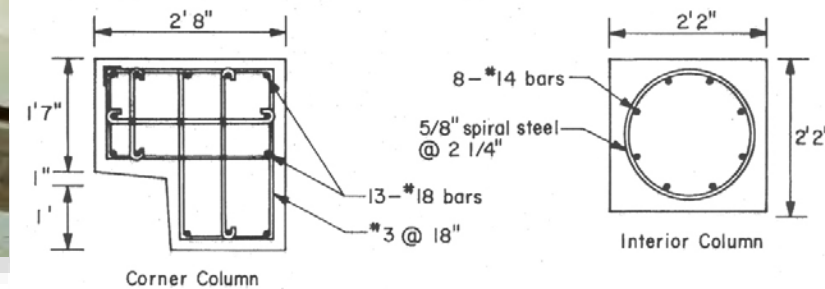
Olive View Hospital, Unit Psikiatri, gempa San Fernando, tahun 1971. Unit ini adalah bangunan beton bertulang 2 lantai. Lantai dasar hancur. Sistem struktur adalah rangka pemikul momen. Sumber: db.world-housing.net



Olive View Hospital, Unit Penganan dan Perawatan Medis, gempa San Fernando, tahun 1971. Tampak ujung salah satu dari empat sayap bangunan beton bertulang 5 lantai setelah gempa. Sumber: db.world-housing.net



Kerusakan kolom-kolom yang merupakan bangunan rangka pemikul momen pada Olive View Hospital rusak akibat gempa San Fernando tahun 1971. Image credit: EIS-Steinbrugge



Typical First Floor Column Details

Detil dimensi dan tulangan kolom Olive View Hospital Columns. Image credit: Jennings

Perkuatan elemen struktur kolom

Perkuatan kolom terkadang diperlukan karena:

- Mutu beton sering mengalami *drop* saat pelaksanaan
- Pengekangan pada daerah sendi plastis yang belum memadai.
- Perubahan fungsi bangunan menyebabkan penambahan beban layan

Salah satu bentuk perkuatan yang populer di industri konstruksi saat ini yaitu perkuatan dengan menggunakan bahan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

Perkuatan dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP)



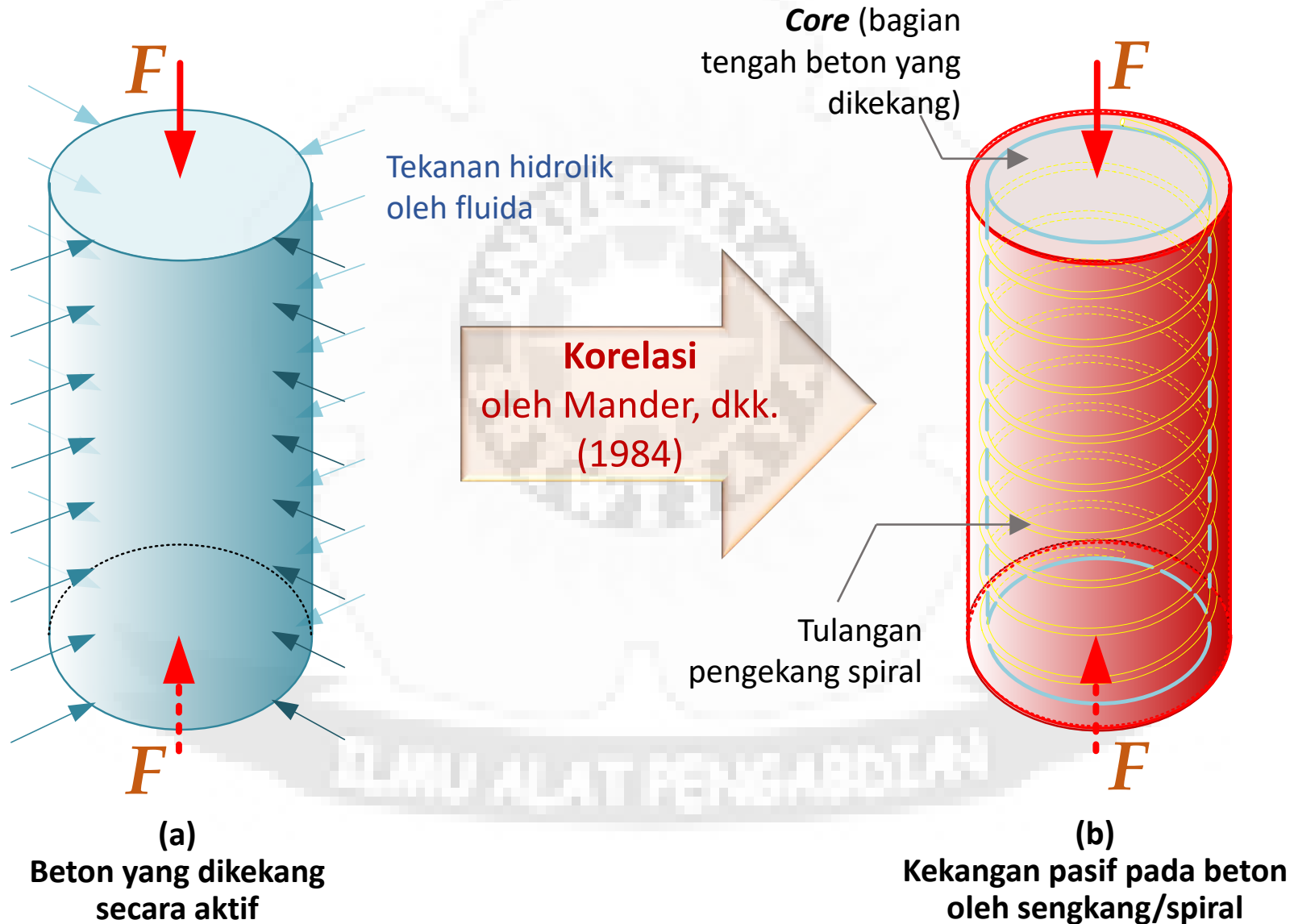
Kekangan (*confinement*) pada beton

Kekangan (*confinement*) pada beton terbagi menjadi dua jenis:

- **Kekangan aktif** dari tekanan lateral **fluida**
- **Kekangan pasif** dari tulangan sengkang

Richart, dkk. (1929) menemukan bahwa kekuatan beton yang dikekang aktif oleh **tekanan lateral fluida** hampir sama dengan beton yang dikekang tekanan pasif oleh **spiral baja melingkar** dan menghasilkan **tekanan lateral yang sama**.

Kekangan pada beton



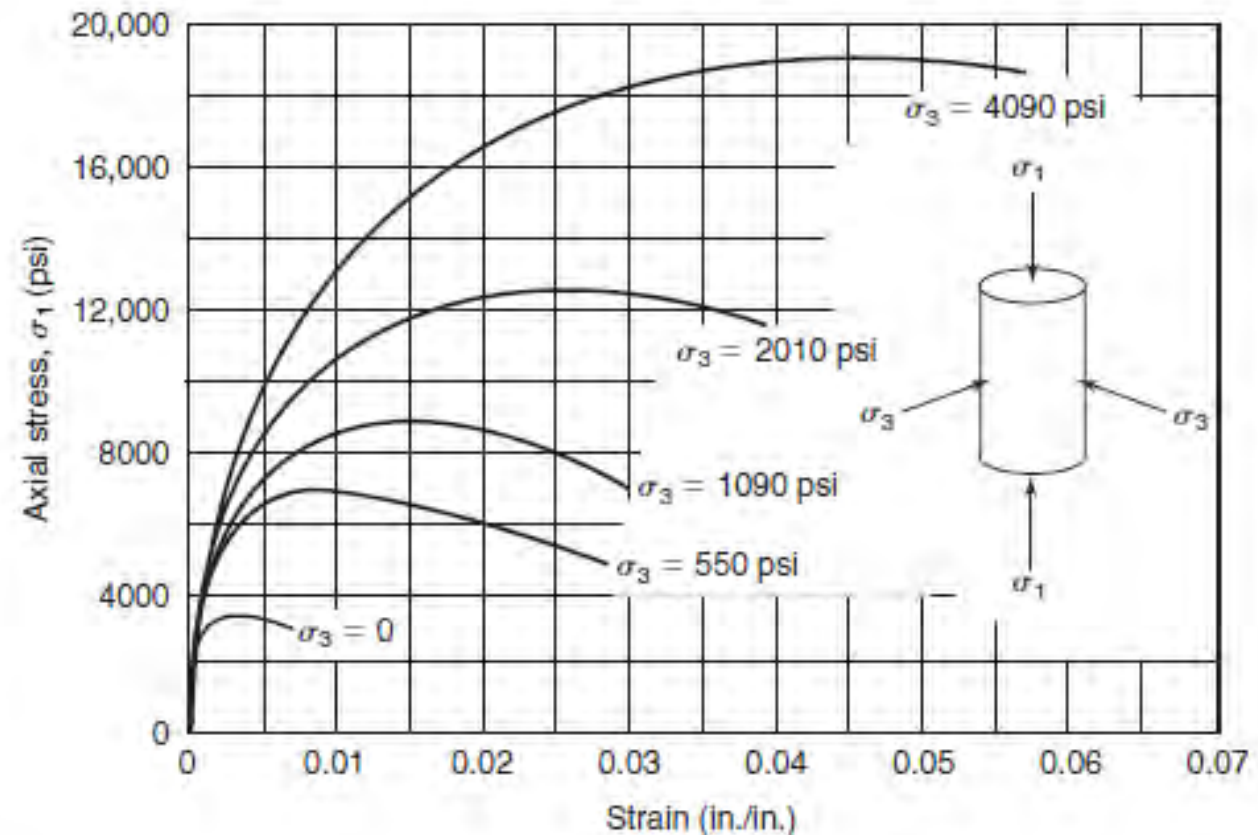
Perilaku beton terhadap beban tekan triaksial

Beban aksial searah tegangan σ_1 menyebabkan munculnya tegangan pada material, yaitu σ_1 dan σ_2 yang saling tegak lurus (lihat halaman 29 file Beton Lanjut_Material beton).

Beban lain dari arah lateral adalah σ_3 (**fluida**). Di bawah tegangan tekan triaksial (3 arah yang saling tegak lurus), mode keruntuhan beton melibatkan fraktur tarik paralel dengan tegangan tekan maksimum (dan dengan demikian ortogonal terhadap regangan tarik maksimum, jika ada) atau mode keruntuhan geser. Kekuatan dan daktilitas beton di bawah tekan triaksial melebihi yang di bawah tekan uniaksial (Gambar. 3-15).

Fig. 3-15
Axial stress-strain curves from triaxial compression tests on concrete cylinders; unconfined compressive strength $f'_c = 3600$ psi. (From [3-3].)

Sumber: Wight, 2016



Perilaku beton terhadap beban tekan triaksial

- Silinder beton tanpa kekangan (*unconfined*) memiliki kekuatan tekan beton terendah.
- Kekangan silinder berupa **tekanan fluida** meningkatkan kekuatan tekan beton

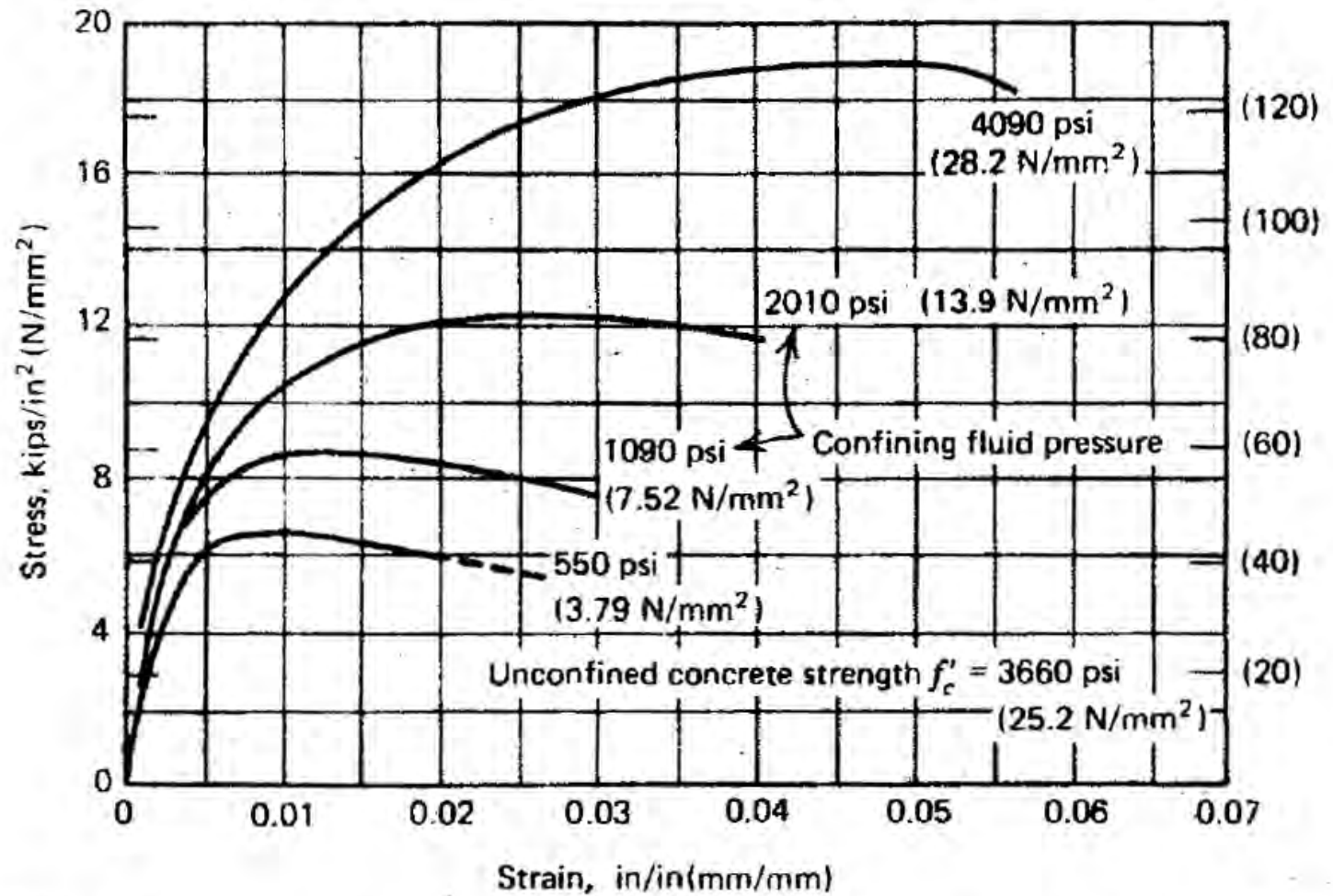


Fig. 2.11. Axial stress-strain curves from triaxial compression tests on concrete cylinders.^{2.13}

Sumber: Park dan Paulay (1975)

Kekangan (*confinement*) dari tulangan sengkang (arah: lateral)

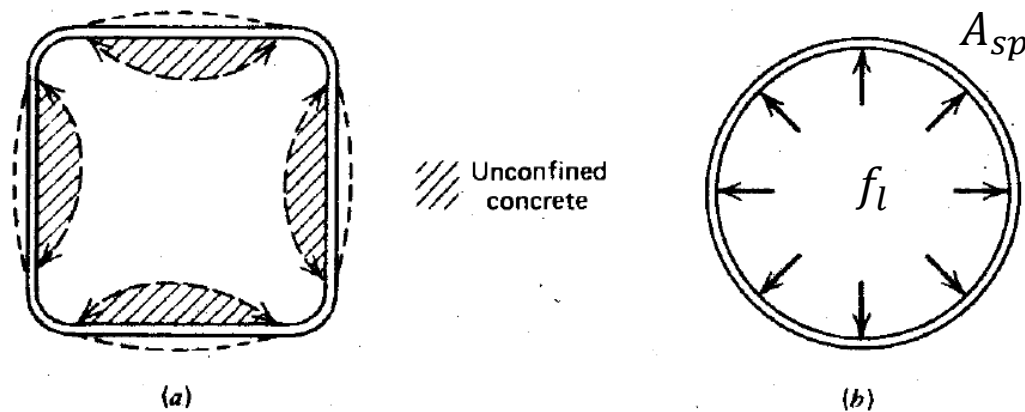


Fig. 2.14. Confinement by square hoops and circular spirals. (a) Square hoop, (b) Circular spiral.

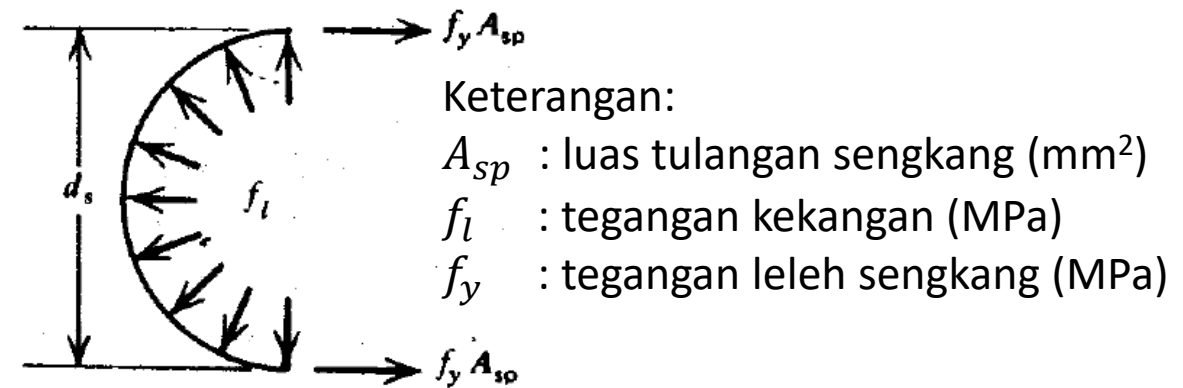


Fig. 2.16. Confinement of concrete by spiral reinforcement.

Sumber: Park dan Paulay (1975)

- Kekangan dari tekanan fluida dikorelasikan menjadi sengkang spiral (Mander, dkk., 1988).
- Tulangan sengkang spiral searah dengan gaya tarik sengkang dan memberikan tekanan kekang menerus di sekitar lingkaran, dan regangan transversal (horizontal) mendekati kemampuan kekangan fluida.
- Sengkang kotak hanya dapat mengekang reaksi di dekat pojok-pojok sengkang karena tekanan beton terhadap sisi sengkang cenderung membengkokkan ke arah luar, maka sebagian potongan melintang beton tidak terkekang. Karena terdapat "busur" internal di antara pojok-pojok, maka beton terkekang secara efektif hanya di pojok dan tengah potongan melintang.
- Sengkang kotak mengekang baja tulangan sehingga menghasilkan peningkatan daktilitas yang signifikan dan peningkatan kekuatan.

Kekangan (*confinement*) dari tulangan sengkang (arah: lateral)

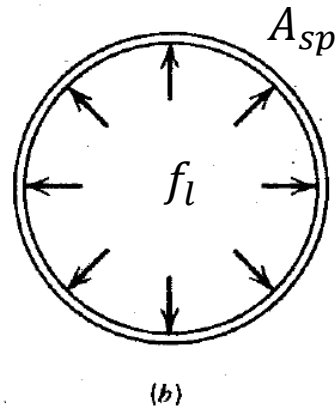
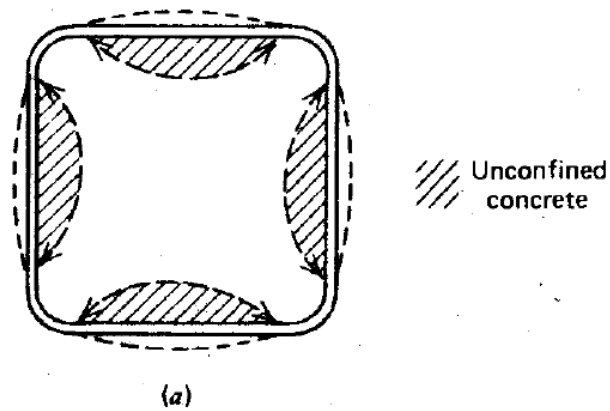
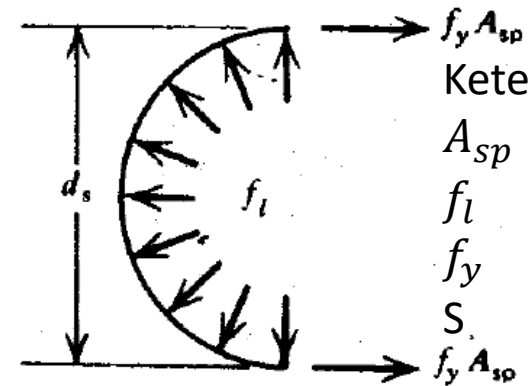


Fig. 2.14. Confinement by square hoops and circular spirals. (a) Square hoop, (b) Circular spiral.



Keterangan:

- A_{sp} : luas tulangan sengkang (mm²)
- f_l : tegangan kekangan (MPa)
- f_y : tegangan leleh sengkang (MPa)
- S_s : spasi sengkang

Fig. 2.16. Confinement of concrete by spiral reinforcement.

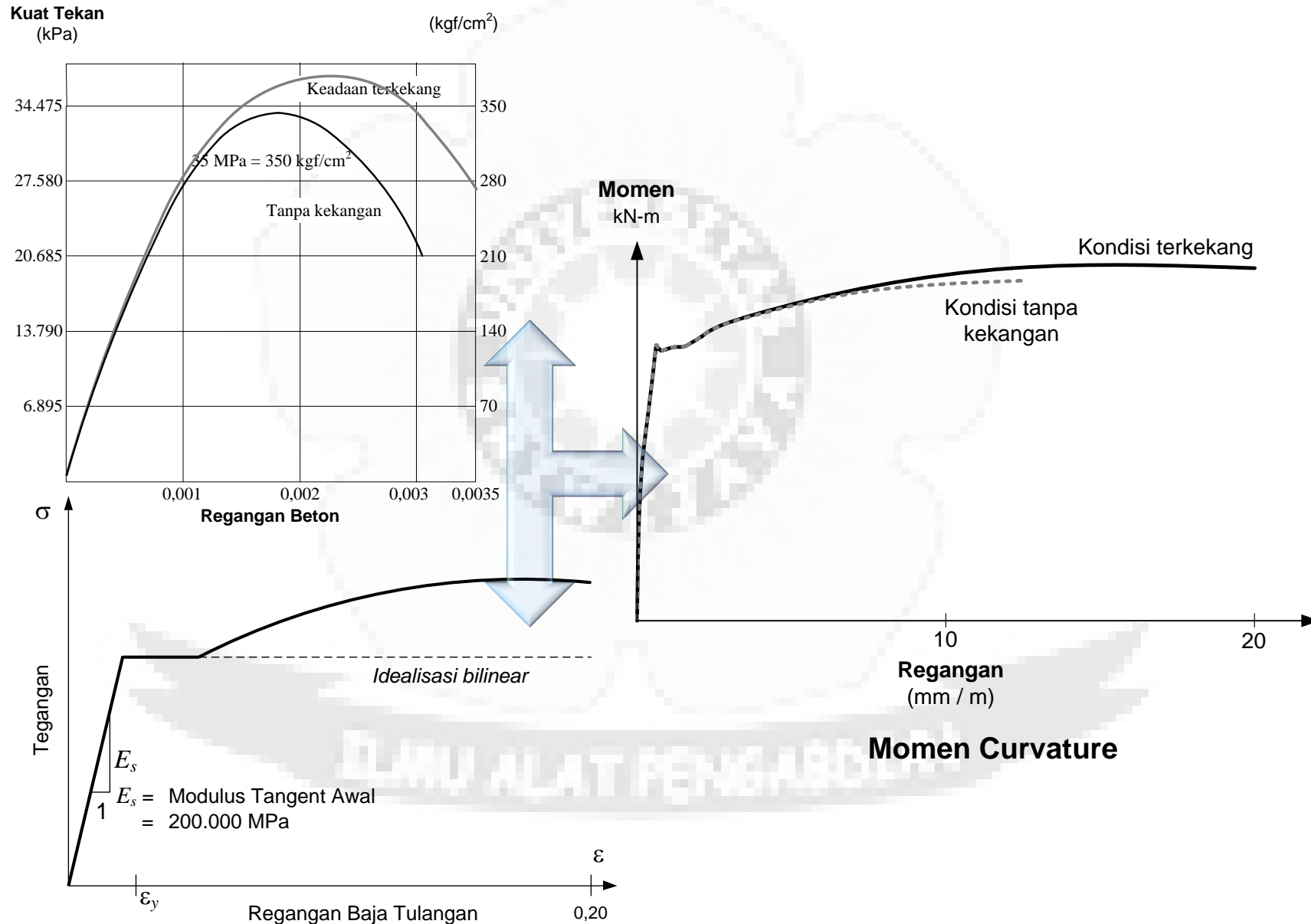
Sumber: Park dan Paulay (1975)

$$2f_y A_{sp} = d_s s f_l \quad \therefore f_l = \frac{2f_y A_{sp}}{d_s s} \quad (2.4)$$

Substituting Eq. 2.4 into Eq. 2.3, we see that the axial compressive strength of concrete confined by a spiral is

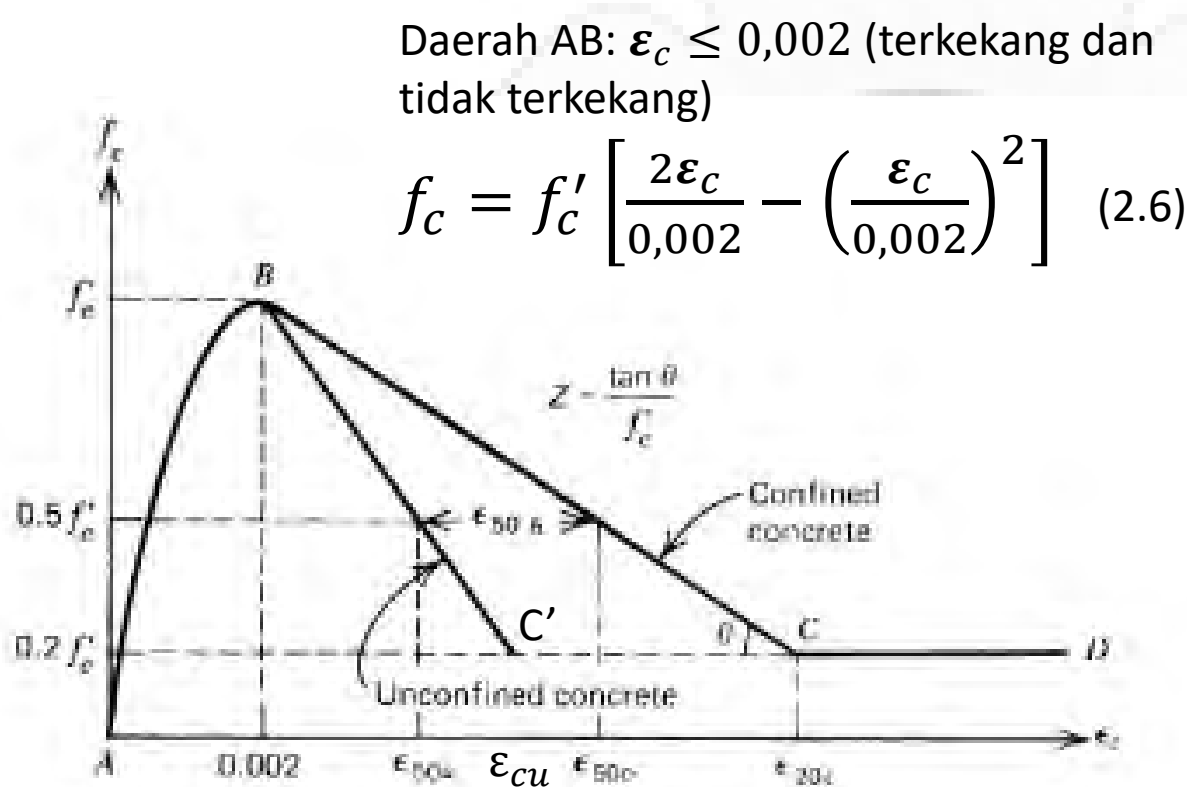
$$f'_{cc} = f'_c + 8.2 \frac{f_y A_{sp}}{d_s s} \quad (2.5)$$

Pengaruh kekangan



Hubungan momen-kelengkungan (*moment-curvature*)

Beton yang dikekang (*confined*) dengan sengkang kotak mencapai regangan *ultimate* (saat tegangan beton $0,2 f'_c$) yang lebih kecil daripada beton yang tidak terkekang (*unconfined*).



Daerah AB: $\epsilon_c \leq 0,002$ (terkekang dan tidak terkekang)

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Daerah BC: $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$ (terkekang)

$$f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon_c - 0,002)] \quad (2.7)$$

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0,002} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 f'_c}{f'_c - 1000} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (2.10)$$

Daerah CD: $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$ (terkekang)

$$f_c = 0,2 f'_c \quad (2.11)$$

Fig. 2.18. Stress-strain curve for concrete confined by rectangular hoops, Kent and Park. ^{2.24}

Sumber: Park dan Paulay (1975)

f'_c : kekuatan tekan silinder beton dalam satuan psi; 1 psi = 0,00689 MPa (N/mm²)

Hubungan momen-kelengkungan (*moment-curvature*)

Daerah BC': $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ (tidak terkekang)

$$f_c = f'_c [1 - 100(\epsilon_c - 0,002)]$$

[dari Fig.6.6, Park dan Paulay (1975)]

Keterangan:

f'_c : kekuatan tekan silinder beton dalam satuan psi; 1 psi = 0,00689 MPa (N/mm²)

ρ_s : perbandingan volume tulangan transversal (sengkang) dengan volume inti beton yang diukur sampai dengan sisi luar tulangan sengkang

b'' : lebar inti beton terkekang yang diukur sampai sisi terluar tulangan sengkang (mm)

s_h : spasi tulangan sengkang (mm)

Z : parameter yang mendefinisikan kemiringan cabang turun linier pada kurva tegangan-regangan beton

Pengaruh ρ_s

Sengkang kotak mempengaruhi kurva hubungan tegangan-regangan pada persamaan 2.6-2.11. Dalam studi ini, kekuatan tekan beton adalah 4000 psi (=27,6 MPa) dan rasio $s_h/b'' = 0,5$.

Kemiringan *descending branch* (setelah f'_c tercapai) semakin landai dengan adanya penambahan ρ_s . Setelah $\rho_s = 2\%$, perubahan kemiringan *descending branch* tidak terlalu signifikan.

ρ_s : perbandingan volume tulangan transversal (sengkang) dengan volume inti beton yang diukur sampai dengan sisi luar tulangan sengkang

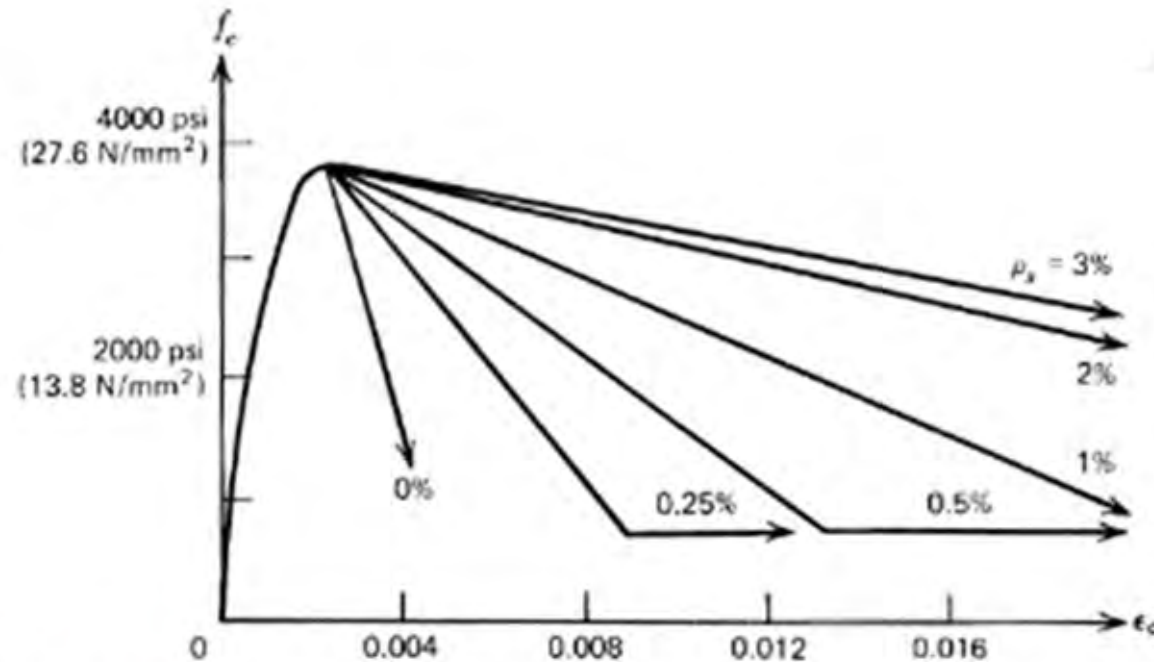


Fig. 2.19. Influence of quantity of hoops on stress-strain curve for concrete when $s_h/b'' = 0.5$ and $f'_c = 4000 \text{ psi} (27.6 \text{ N/mm}^2)$.^{2,24}

Sumber: Park dan Paulay (1975)

Persamaan tegangan-regangan beton terkekang (*confined*)

Hasil penelitian awal memperlihatkan bahwa kekuatan dan regangan longitudinal yang terkait pada saat kekuatan beton tercapai akibat dikekang dengan tekanan fluida hidrostatik aktif dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right] \quad (2)$$

dengan:

f'_{cc} : tegangan maksimum beton

ϵ_{cc} : regangan beton saat tegangan maksimum tercapai

f_l : tekanan lateral dari fluida

f'_{co} : kekuatan beton yang tidak dikekang

ϵ_{co} : regangan beton yang terkait dengan kekuatan beton tidak terkekang

k_1 : koefisien campuran beton

k_2 : koefisien tekanan lateral

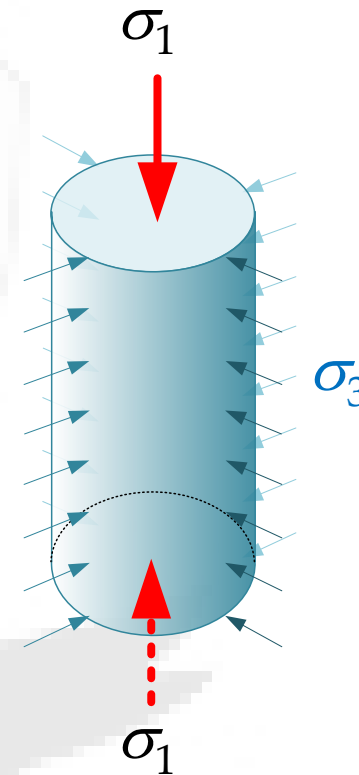


Image credit: Imran dan Budiono (2014)
Sumber: Mander, dkk. (1988)

Persamaan tegangan-regangan beton terkekang (*confined*)

Menurut Richart, dkk. (1928), $k_1 = 4,1$ dan $k_2 = 5k_1$, sehingga persamaan (1) dan (2) menjadi:

$$\sigma_1 = f'_c + 4,1\sigma_3 \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon'_{cc}}{\varepsilon'_c} = 5 \left[\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 0,8 \right] \quad (4)$$

dengan:

σ_1 : tegangan aksial beton terkekang ($= f'_{cc}$)

σ_3 : tekanan lateral ($= f_l$)

f'_c : kekuatan tekan beton ($= f'_{co}$)

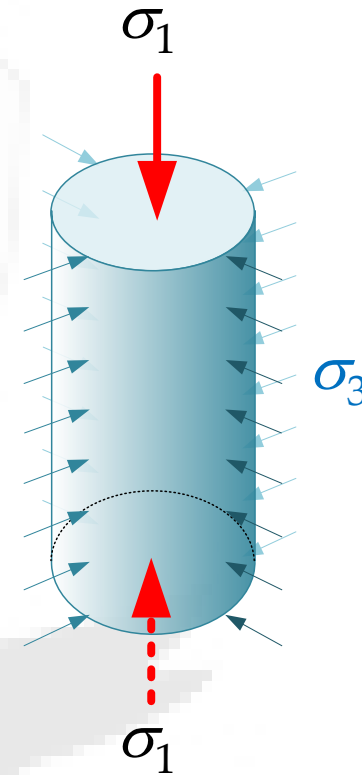


Image credit: Imran dan Budiono (2014)
Sumber: Mander, dkk. (1988)

Persamaan dasar untuk pembebanan monotonik tekan dengan model Mander

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \dots\dots\dots (3)$$

where f'_{cc} = compressive strength of confined concrete (defined later).

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \dots\dots\dots (4)$$

where ϵ_c = longitudinal compressive concrete strain.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (5)$$

as suggested by Richart et al. (1928), where f'_{co} and ϵ_{co} = the unconfined concrete strength and corresponding strain, respectively (generally $\epsilon_{co} = 0.002$ can be assumed), and

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \dots\dots\dots (6)$$

where

$$E_c = 5,000 \sqrt{f'_{co}} \text{ MPa} \dots\dots\dots (7)$$

is the tangent modulus of elasticity of the concrete (1 MPa = 145 psi), and

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \dots\dots\dots (8)$$

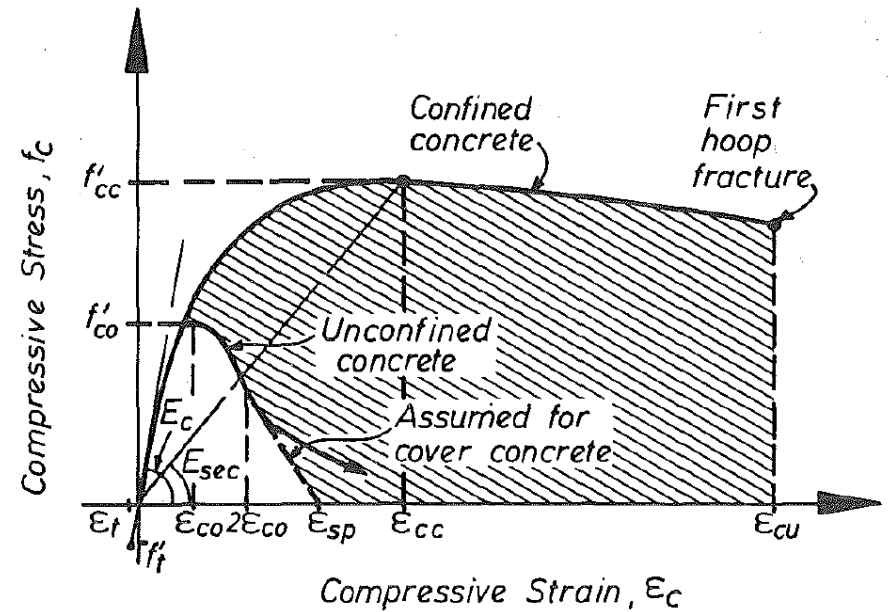


FIG. 1. Stress-Strain Model Proposed for Monotonic Loading of Confined and Unconfined Concrete

Persamaan dasar untuk pembebanan monotonik tekan dengan model Mander

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c} - \frac{2 f'_l}{f'_c}} - 1.254 \right)$$

$$\epsilon_{cc} = 0.002 \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right]$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$$

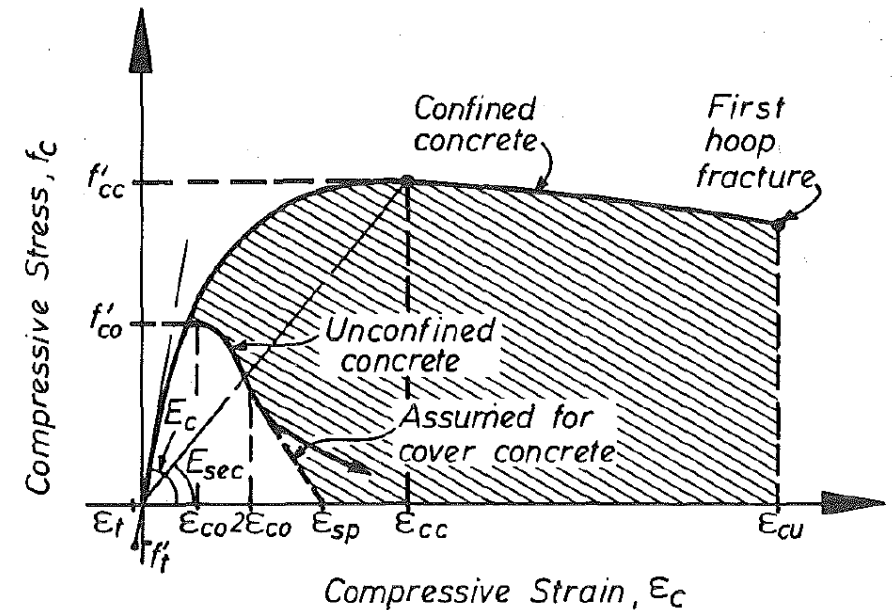


FIG. 1. Stress-Strain Model Proposed for Monotonic Loading of Confined and Unconfined Concrete

ILMU ALAT PENGABDIAN

Tekanan pengekan lateral efektif dan koefisien keefektifan kekangan



$$f'_l = f_l k_e \dots\dots\dots (9)$$

where f_l = lateral pressure from the transverse reinforcement, assumed to be uniformly distributed over the surface of the concrete core;

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \dots\dots\dots (10)$$

= confinement effectiveness coefficient; A_e = area of effectively confined concrete core;

$$A_{cc} = A_c(1 - \rho_{cc}) \dots\dots\dots (11)$$

ρ_{cc} = ratio of area of longitudinal reinforcement to area of core of section; and A_c = area of core of section enclosed by the center lines of the perimeter spiral or hoop.

Sumber: Mander, dkk. (1988)

Keefektifan kekangan untuk potongan penampang yang dikekang dengan spiral atau sengkang bundar

A_e : area inti beton terkekang efektif (*effectively confined core*; mm²)

A_{cc} : area beton di dalam garis tengah sengkang spiral atau kotak (mm²)

$$A_e < A_{cc}$$

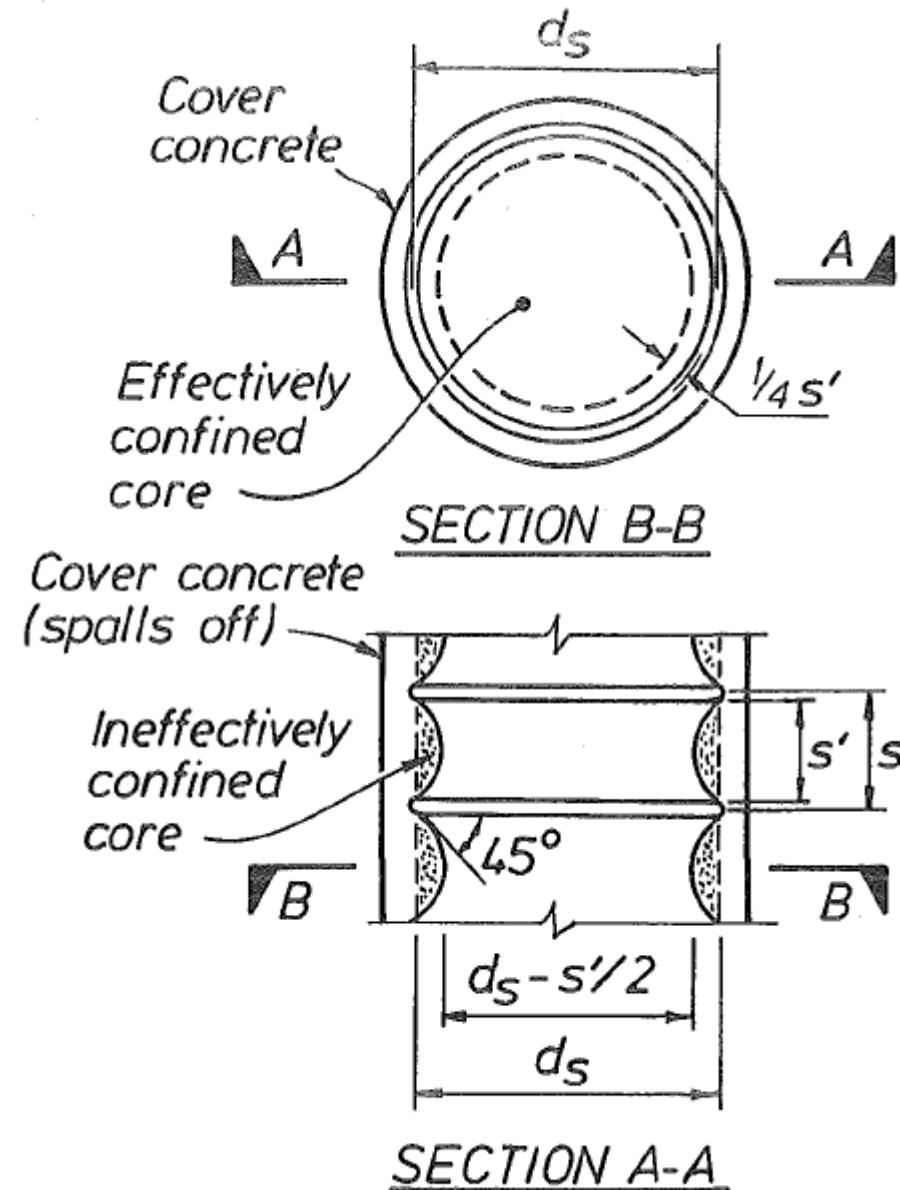


FIG. 2. Effectively Confined Core for Circular Hoop Reinforcement
Sumber: Mander, dkk. (1988)

Keefektifan kekangan untuk potongan penampang yang dikekang dengan spiral atau sengkang bundar

If in Fig. 2 the arching action is assumed to occur in the form of a second-degree parabola with an initial tangent slope of 45°, the area of an effectively confined concrete core at midway between the levels of transverse reinforcement is

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} d_s^2 \left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

where s' = clear vertical spacing between spiral or hoop bars; and d_s = diameter of spiral between bar centers. Also the area of concrete core is

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc}) \dots\dots\dots (13)$$

Therefore, from Eq. 10, the confinement effectiveness coefficient is for circular hoops

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2}{1 - \rho_{cc}} \dots\dots\dots (14)$$

Similarly it can be shown that for circular spirals

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \dots\dots\dots (15)$$

Keefektifan kekangan untuk potongan penampang yang dikekang dengan spiral atau sengkang bundar

The lateral confining pressure may be found by considering the half body confined by a spiral or circular hoop. If the uniform hoop tension developed by the transverse steel at yield exerts a uniform lateral stress on the concrete core, then equilibrium of forces requires that

$$2f_{yh}A_{sp} = f_l s d_s \dots\dots\dots (16)$$

where f_{yh} = yield strength of the transverse reinforcement; A_{sp} = area of transverse reinforcement bar; f_l = lateral confining pressure on concrete and s = center to center spacing or pitch of spiral or circular hoop.

Now if ρ_s = ratio of the volume of transverse confining steel to the volume of confined concrete core, then

$$\rho_s = \frac{A_{sp}\pi d_s}{\frac{\pi}{4} d_s^2 s} = \frac{4A_{sp}}{d_s s} \dots\dots\dots (17)$$

Substituting Eq. 17 into Eq. 16 and rearranging gives

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \dots\dots\dots (18)$$

Therefore from Eq. 9, the effective lateral confining stress on the concrete is

$$f_l' = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \dots\dots\dots (19)$$

where k_e is given by Eqs. 14 or 15.

Keefektifan kekangan untuk potongan penampang beton persegi yang dikekang dengan sengkang kotak dengan atau tanpa ikatan silang

Kekangan berbentuk busur diasumsikan berbentuk parabola dengan sudut awal 45 derajat.

Busur kekangan berlokasi:

- di antara lapisan-lapisan tulangan sengkang (transversal) dengan posisi vertikal dan
- di antara tulangan-tulangan longitudinal dengan posisi horisontal.

Pada satu parabola, area kekangan yang tidak efektif adalah $(w'_i)^2 / 6$ dengan w'_i adalah jarak bersih antara baja tulangan longitudinal.

Luas area total inti beton yang tidak terkekang efektif di level sengkang jika terdapat baja tulangan longitudinal sebanyak n adalah:

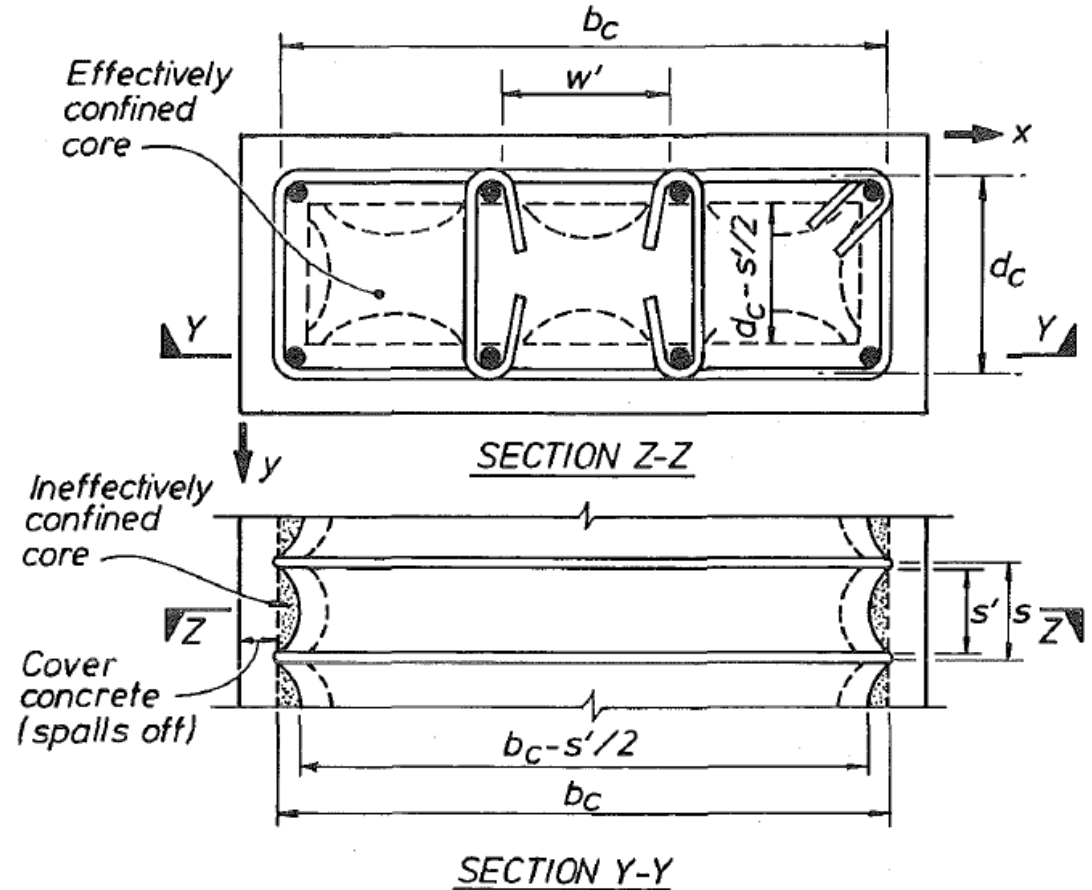


FIG. 3. Effectively Confined Core for Rectangular Hoop Reinforcement

Sumber: Mander, dkk. (1988)

Keefektifan kekangan untuk potongan penampang beton persegi yang dikekang dengan sengkang kotak dengan atau tanpa ikatan silang

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \dots \dots \dots (20)$$

Incorporating the influence of the ineffective areas in the elevation (Fig. 3), the area of effectively confined concrete core at midway between the levels of transverse hoop reinforcement is

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \dots \dots \dots (21)$$

where b_c and d_c = core dimensions to centerlines of perimeter hoop in x and y directions, respectively, where $b_c \geq d_c$. Also, the area of concrete core enclosed by the perimeter hoops is given by Eq. 11. Hence from Eq. 10 the confinement effectiveness coefficient is for rectangular hoops

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_c d_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})} \dots \dots \dots (22)$$

It is possible for rectangular reinforced concrete members to have different quantities of transverse confining steel in the x and y directions. These may be expressed as

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sd_c} \dots\dots\dots (23)$$

and

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{sb_c} \dots\dots\dots (24)$$

where A_{sx} and A_{sy} = the total area of transverse bars running in the x and y directions, respectively (see Fig. 3).

The lateral confining stress on the concrete (total transverse bar force divided by vertical area of confined concrete) is given in the x direction as

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{sd_c} f_{yh} = \rho_x f_{yh} \dots\dots\dots (25)$$

and in the y direction as

$$f_{ly} = \frac{A_{sy}}{sb_c} f_{yh} = \rho_y f_{yh} \dots\dots\dots (26)$$

From Eq. 9 the effective lateral confining stresses in the x and y directions are

$$f'_{lx} = k_e \rho_x f_{yh} \dots\dots\dots (27)$$

and $f'_{ly} = k_e \rho_y f_{yh} \dots\dots\dots (28)$

where k_e is given in Eq. 22.

Kekuatan tekan beton terkekang (f'_{cc})

The general solution of the multiaxial failure criterion in terms of the two lateral confining stresses is presented in Fig. 4. When the confined concrete core is placed in triaxial compression with equal effective lateral confining stresses f'_i from spirals or circular hoops, it can be shown that the confined compressive strength given is:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_i}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_i}{f'_{co}} \right) \dots \dots \dots (29)$$

where f'_{co} = unconfined concrete compressive strength; and f'_i is given by Eq. 19.

As a numerical example, consider a column with an unconfined strength of $f'_{co} = 30$ MPa (4,350 psi) and confining stresses given by Eqs. 28 and 29 of $f'_{ly} = 2.7$ MPa (390 psi) and $f'_{lx} = 5.1$ MPa (740 psi). Then, by following the dotted line in Fig. 4, the compressive strength of the confined concrete is found to be $f'_{cc} = 1.65 \times 30 = 49.5$ MPa (7,170 psi).

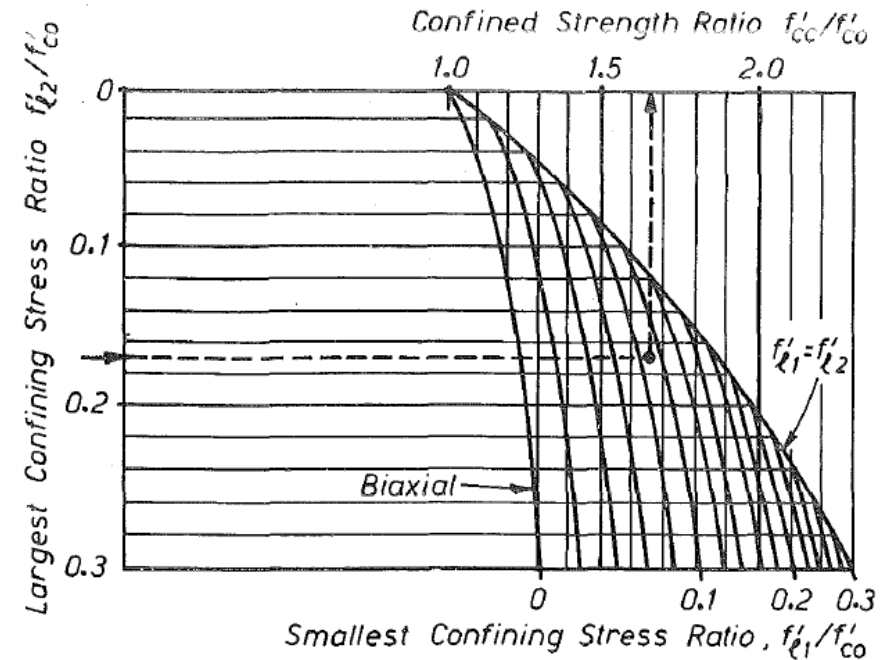
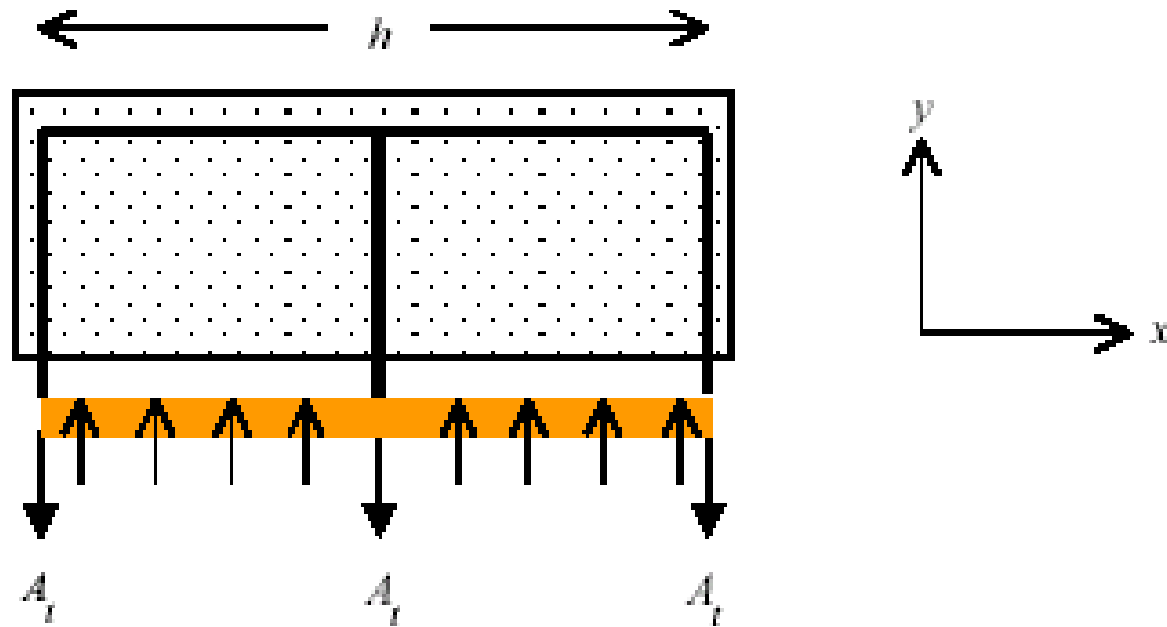


FIG. 4. Confined Strength Determination from Lateral Confining Stresses for Rectangular Sections

Sumber: Mander, dkk. (1988)

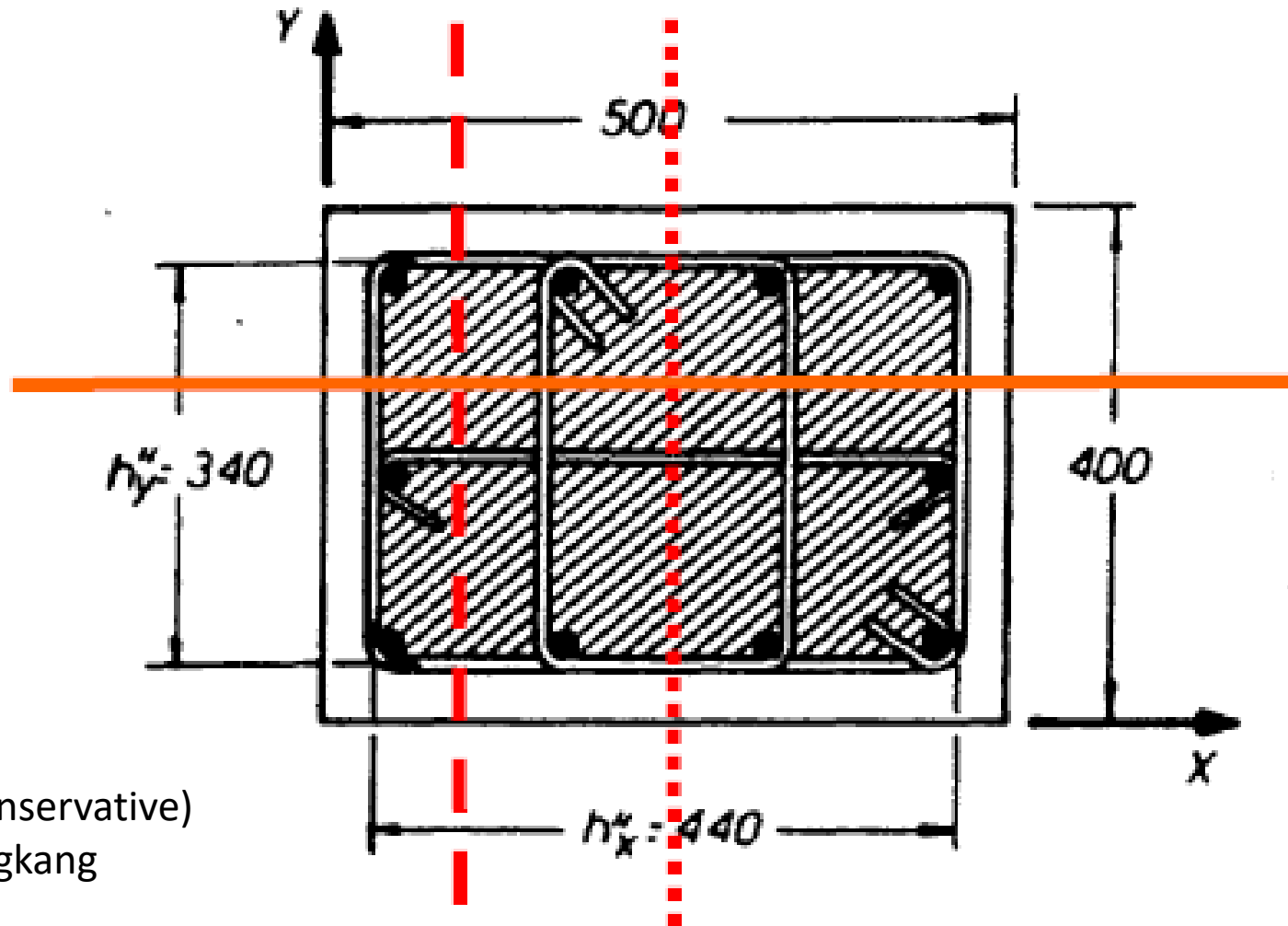
ILMU ALAT PENGABDIAN

Rasio Volumetrik Tulangan Sengkang



$$\rho_y = \frac{nA_t}{hs_t}$$

A_{shx} dan A_{shy} : Luas total penampang sengkang tertutup persegi arah sumbu x dan y



$$A_{shy} = 4,00 A_{sc}$$

$$A_{shx} = 3,67 A_{sc}$$

$$A_{shx} = 3,00 A_{sc} \text{ (conservative)}$$

A_{sc} : tulangan sengkang

Contoh pengaruh kekangan terhadap perilaku histeretik

25.7.3.3 Rasio volumetrik tulangan spiral ρ_s , harus memenuhi Pers. (25.7.3.3).

$$\rho_s \geq 0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (25.7.3.3)$$

dimana nilai f_{yt} tidak boleh lebih besar dari 700 MPa.

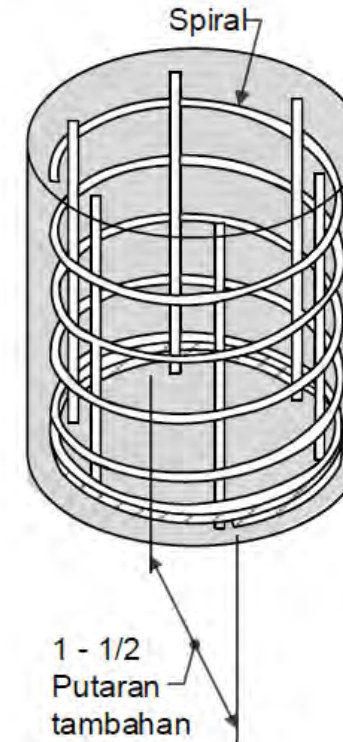
Sumber: SNI 2847:2019

dengan

A_{ch} : luas penampang komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan transversal (mm²)

A_g : luas gross penampang beton (mm²)

R25.7.3.4 Angkur spiral diilustrasikan pada Gambar R25.7.3.4.



Gambar R25.7.3.4 – Pengangkuran spiral

Contoh pengaruh kekangan terhadap perilaku histeretik

Table 1. Details of Test Specimens

Spec.	f'_c (MPa)	Lateral Steel					Longitudinal Steel			Axial Load	
		Size (#)	Spac (mm)	ρ_s (%)	f_{yh} (MPa)	A_{sh} $A_{sh(ACI)}$	No. & Size (#)	ρ_t (%)	f_{yt} (MPa)	P $f'_c A_g$	P P_o
RS-17HT	74.1	8.0 mm	75	1.83	1360*	1.14*	8-20M	2.74	521	0.34	0.33
RS-18HT	74.1	8.0 mm	75	1.83	1360*	1.14*	8-20M	2.74	521	0.50	0.49
RS-19HT	74.2	11.1 mm	75	3.54	1402*	2.20*	8-20M	2.74	521	0.53	0.52
RS-20HT	74.2	11.1 mm	140	1.90	1402*	1.18*	8-20M	2.74	521	0.34	0.33

* : The maximum average tie strain reached in Specimens RS-17HT, RS-18HT, RS-19-HT and RS-20HT is 0.00425. Therefore maximum attainable strength of 850 MPa is used the calculations.

ρ_s : rasio volume tulangan spiral terhadap volume total inti yang dikekang oleh spiral (diukur dari sisi luar ke sisi luar spiral)

Contoh pengaruh kekangan terhadap perilaku histeretik

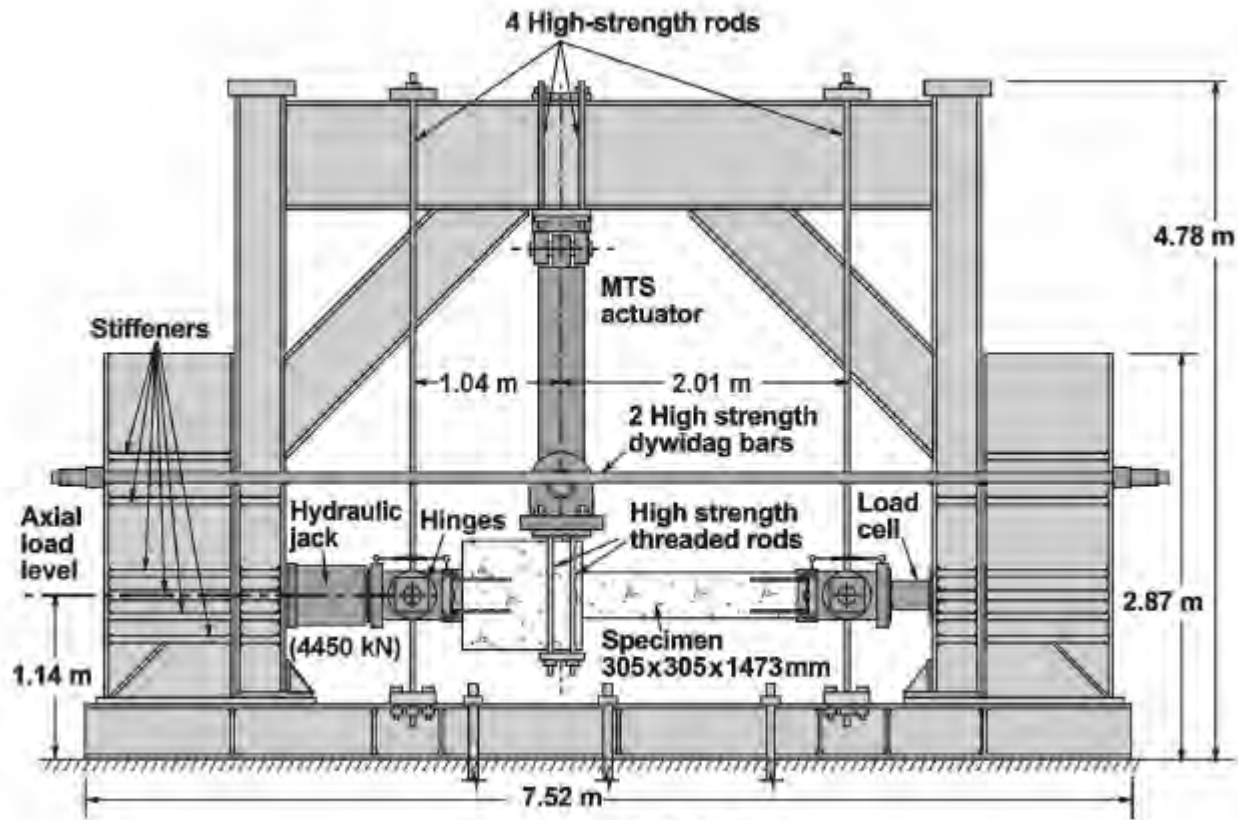


Figure 1. Test Setup

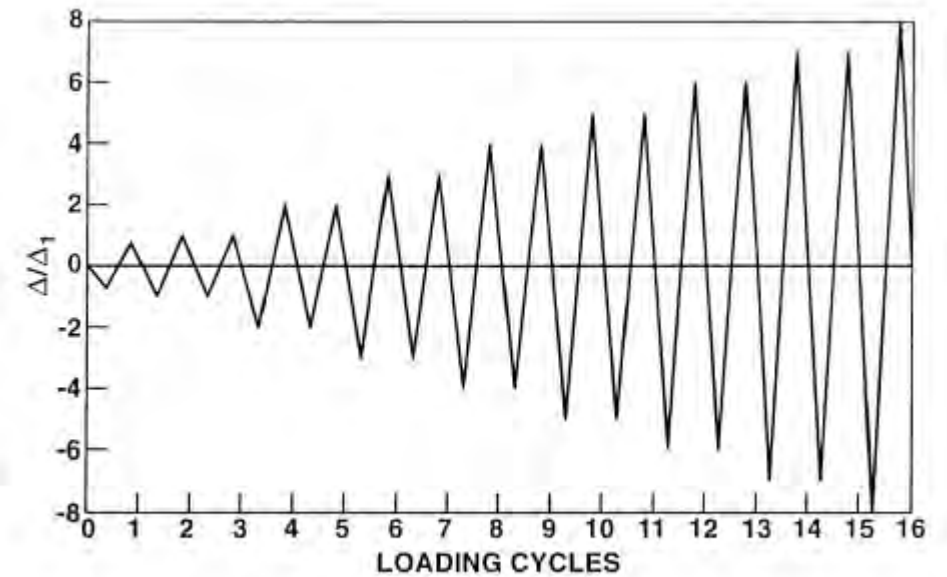
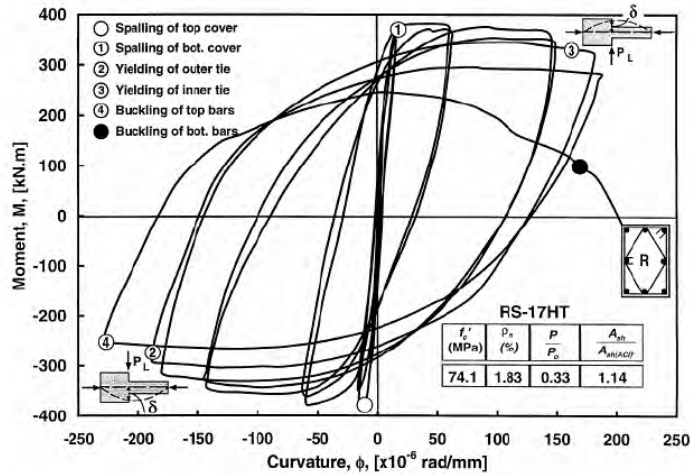


Figure 2. Typical Lateral Displacement History
(berdasarkan standar dari New Zealand)

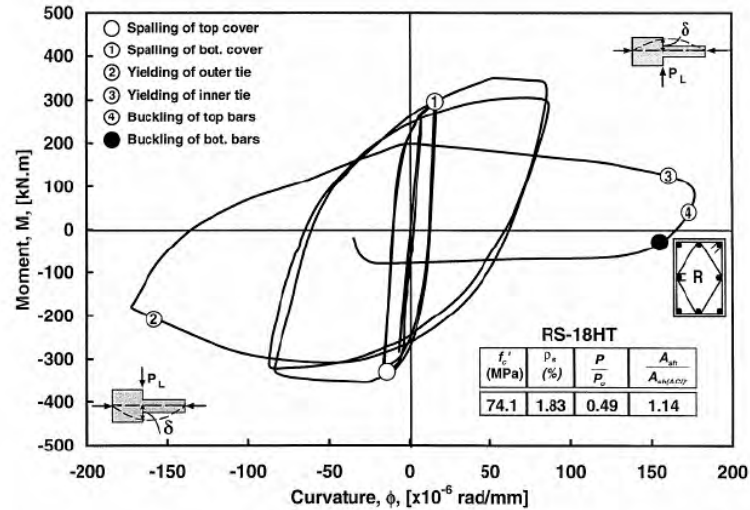
ILMU ALAT PENGABDIAN

Contoh pengaruh kekangan terhadap perilaku histeretik



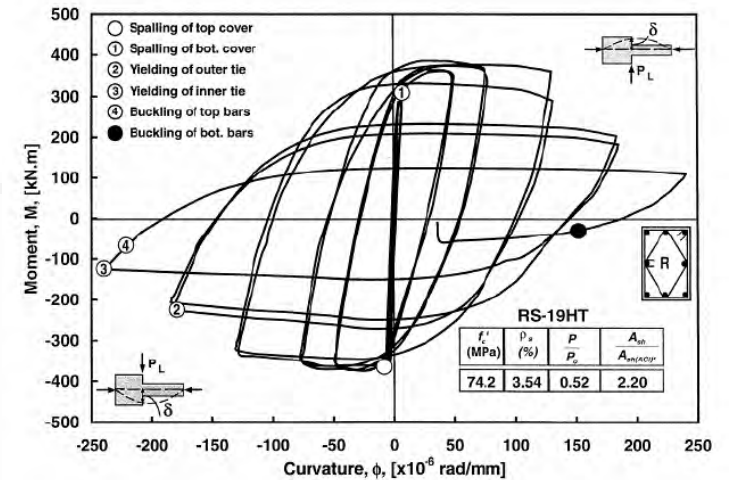
(b) Moment vs. Curvature

Figure 4 Behavior of Specimen RS-17HT



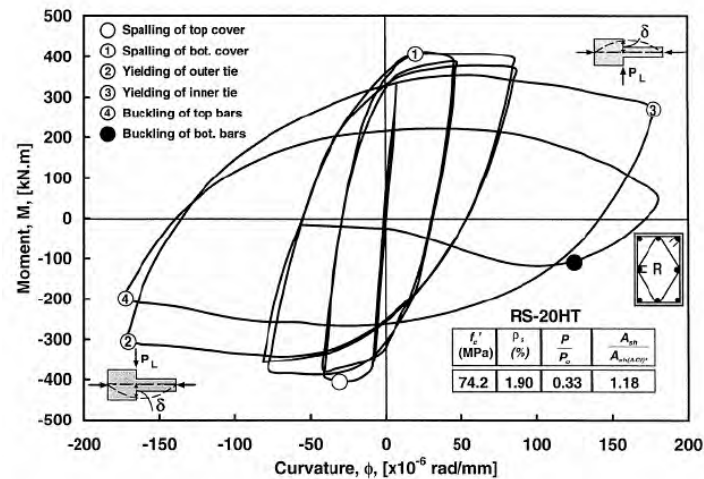
(b) Moment vs. Curvature

Figure 5 Behavior of Specimen RS-18HT



(b) Moment vs. Curvature

Figure 6 Behavior of Specimen RS-19HT



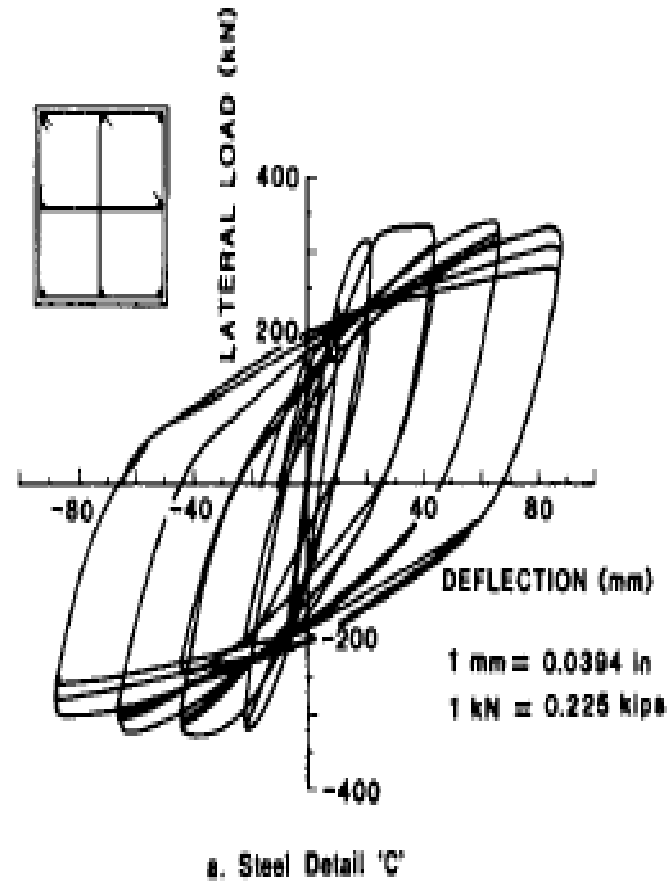
(b) Moment vs. Curvature

Figure 7 Behavior of Specimen RS-20HT

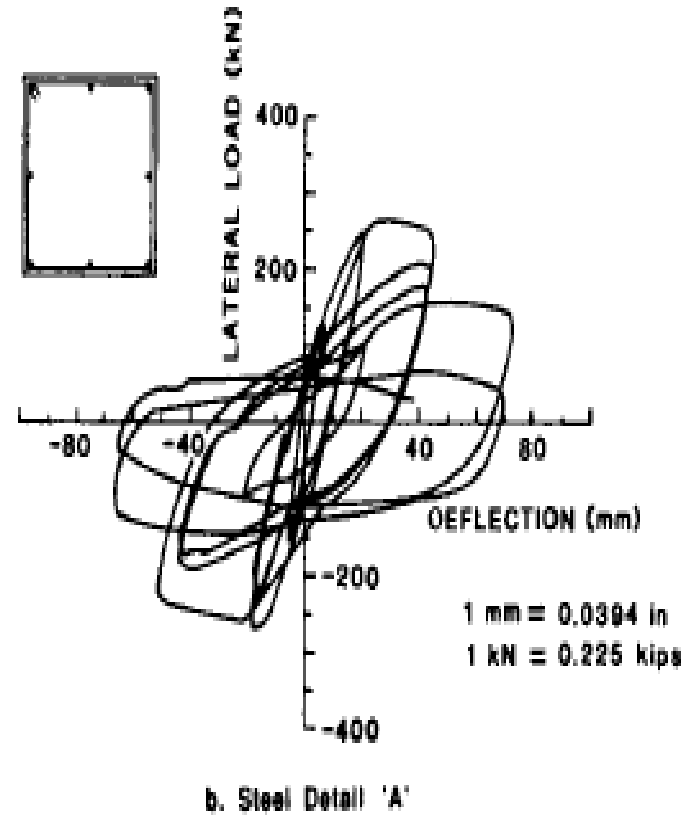
Spec.	f'_c (MPa)	Lateral Steel				
		Size (#)	Spac (mm)	ρ_s (%)	f_{yh} (MPa)	$\frac{A_{sh}}{A_{sh(ACI)}}$
RS-17HT	74.1	8.0 mm	75	1.83	1360*	1.14*
RS-18HT	74.1	8.0 mm	75	1.83	1360*	1.14*
RS-19HT	74.2	11.1 mm	75	3.54	1402*	2.20*
RS-20HT	74.2	11.1 mm	140	1.90	1402*	1.18*

Penambahan tulangan sengkang (ρ_s) meningkatkan kelengkungan (*curvature*), sehingga perilaku histeretik semakin baik dalam menahan beban gempa

Perilaku histeretik kolom terkekang efektif dan tidak efektif

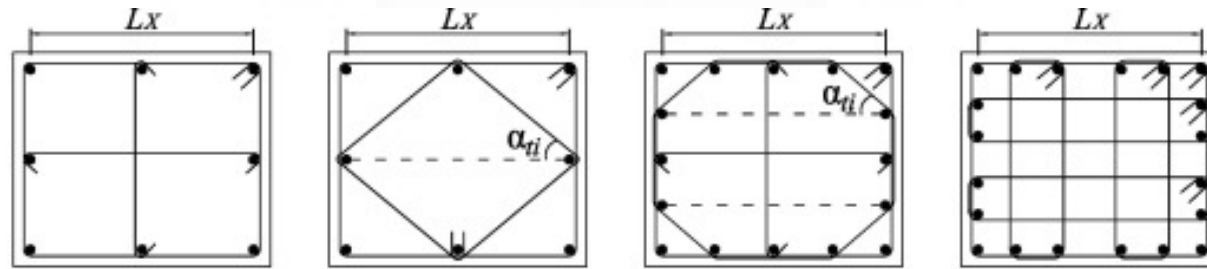


Kekangan Efektif

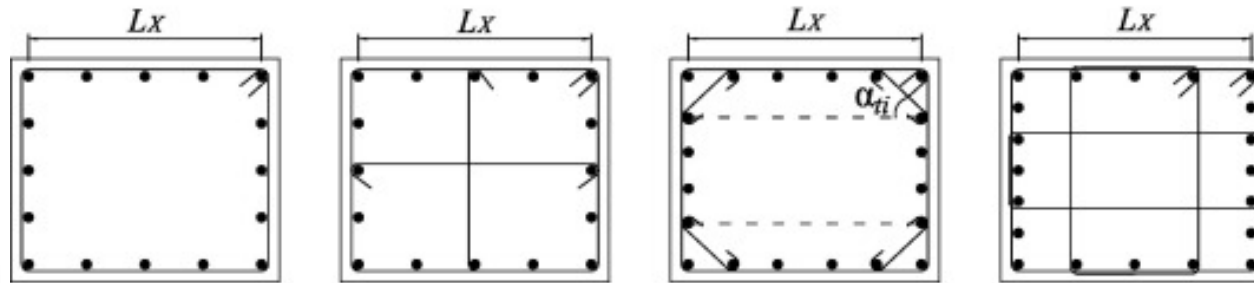


Kekangan tidak efektif

Variasi bentuk tulangan sengkang



(a) Type I



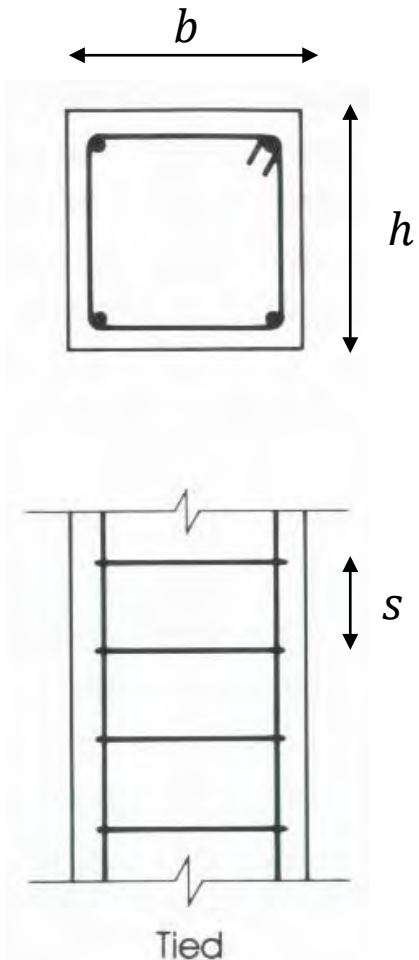
(b) Type II

Contoh pemasangan tulangan sengkang pada kolom

Image credit: Imran dan Zulkifli (2014)

Kekangan pasif berupa sengkang

Kolom dengan sengkang ikat: umum digunakan



Spasi sengkang ikat: $s \approx h$ (kecuali untuk desain gempa: $s < h$)

Sengkang ikat berfungsi:

- memberi tumpuan lateral pada tulangan longitudinal (mengurangi tekuk)
- memberi kekangan terhadap beton inti

Tulangan sengkang spiral

Diameter minimum tulangan sengkang spiral adalah 10 mm dengan aturan spasi (SNI 2847: 2019 Pasal 25.7.3.1):

- spasi minimum sengkang spiral: 25 mm
- spasi maksimum sengkang spiral: 75 mm

Nilai rasio tulangan spiral:

$$\rho_s = \frac{\text{volume spiral}}{\text{volume inti (core)}} = \frac{A_{sp} \pi D_c}{0,25 \pi D_c^2 s} = \frac{4A_{sp}}{D_c s}$$

dengan:

A_{sp} : luas penampang tulangan spiral (mm²)

s : spasi sengkang spiral (mm)

D_c : diameter inti kolom beton = jarak antar tepi luar tulangan sengkang spiral (mm)

Persyaratan rasio tulangan spiral minimum (SNI 2847:2019 Pasal 25.7.3.3):

$$\rho_s = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \text{ dengan:}$$

A_g : luas penampang gross kolom (mm²) = $0,25 \pi D^2$ (mm²)

A_c : luas penampang inti kolom beton = $0,25 \pi D_c^2$ (mm²)

A_{st} : luas total tulangan longitudinal (mm²)

f'_c : kuat tekan beton (MPa)

f_y : kuat leleh baja tulangan sengkang spiral (≤ 400 MPa)

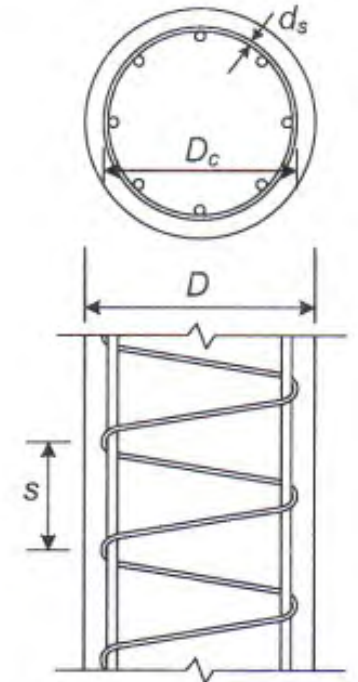
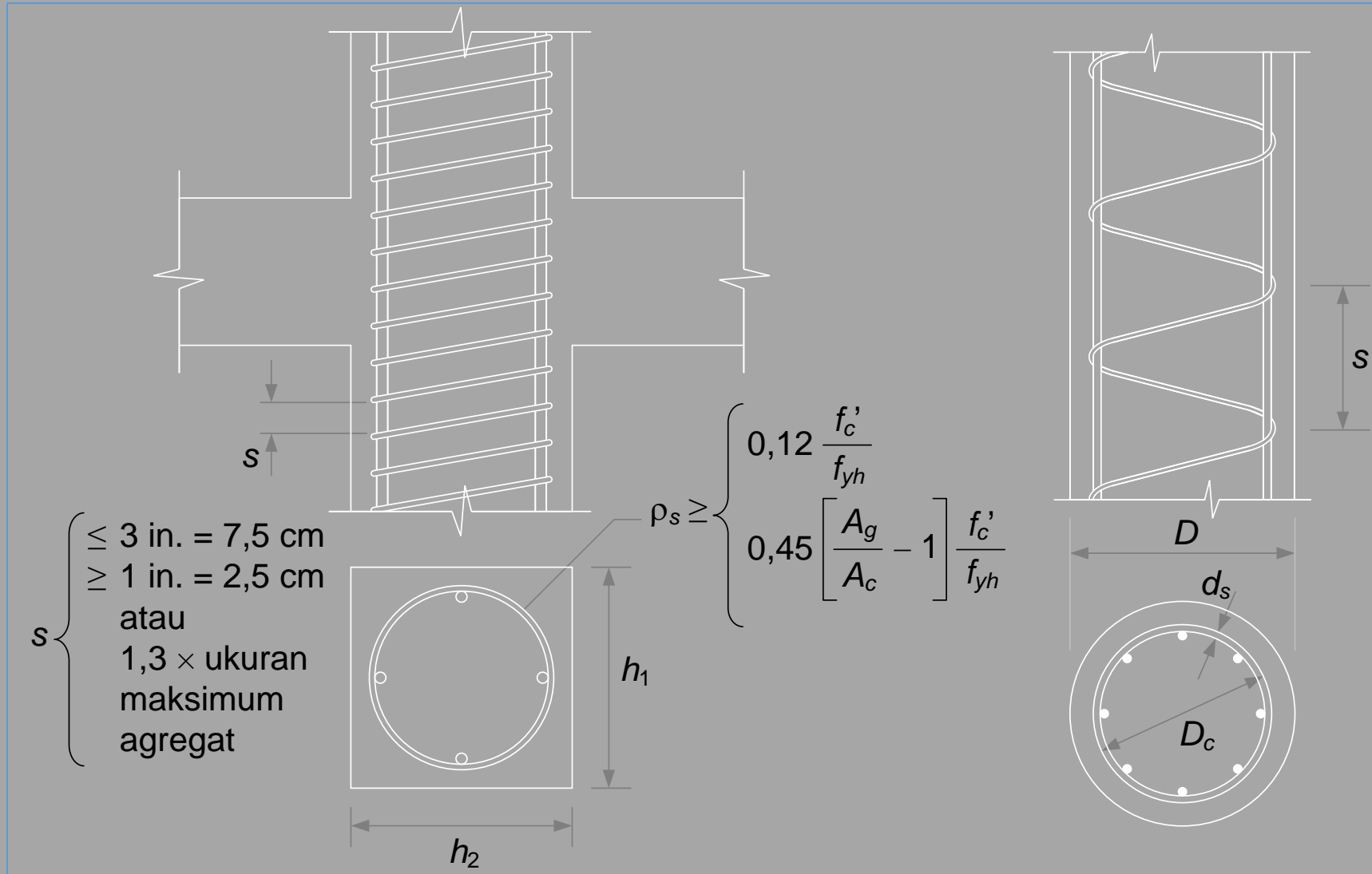


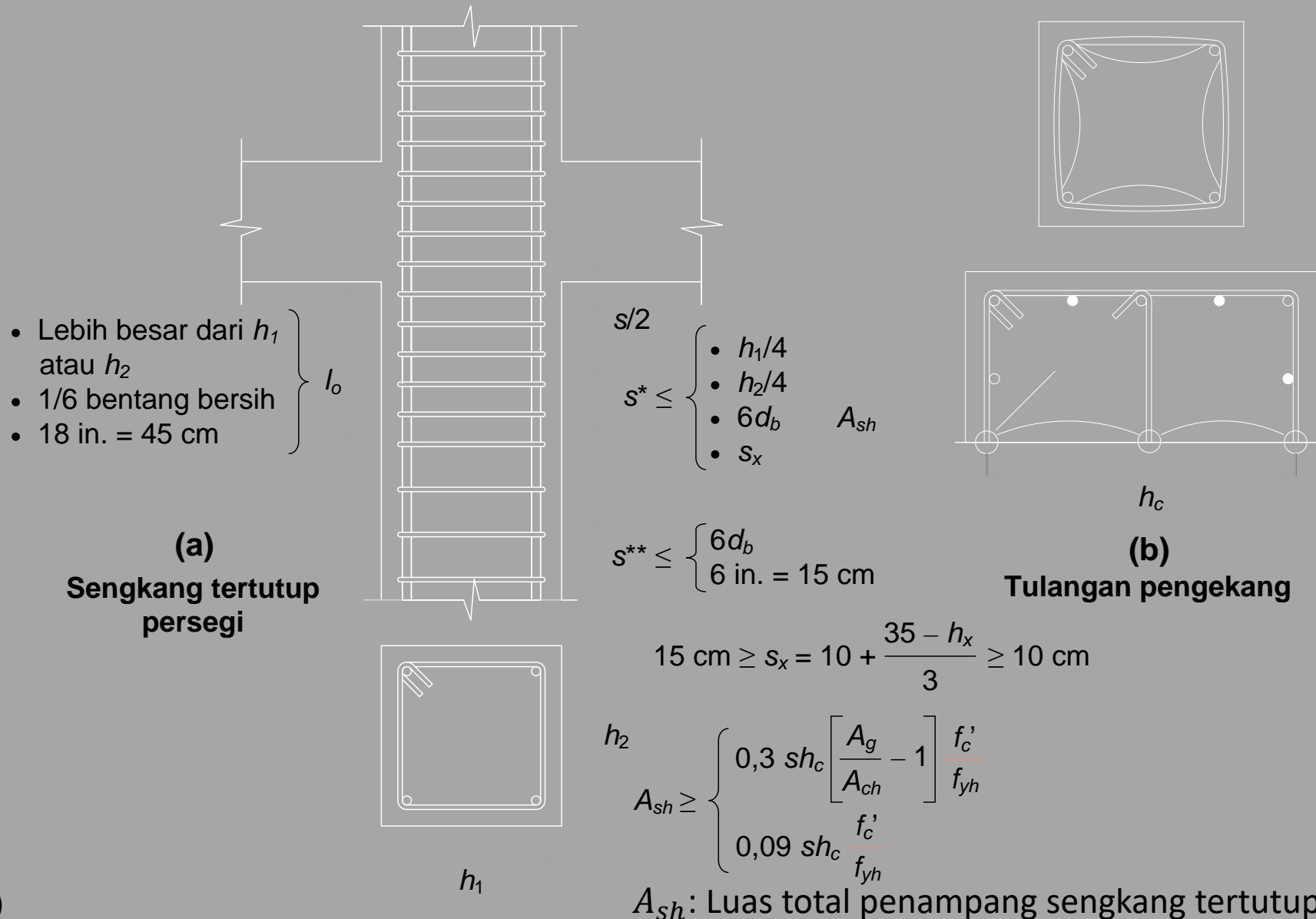
Image credit: Imran dan Zulkifli, 2014

Tulangan minimum untuk pengekok spiral



A_c : luas penampang terkekang (*confined*)

Tulangan minimum untuk pengekan persegi



Tulangan Transversal (Gempa)

- Rasio volumetrik tulangan spiral atau sengkang cincin, ρ_s , tidak boleh kurang daripada yang ditentukan persamaan berikut ini:

$$\rho_s = 0,12 f'_c / f_{yh} \qquad \rho_s^* = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}$$

- Luas total penampang sengkang tertutup persegi tidak boleh kurang daripada yang ditentukan pada persamaan berikut ini:

$$A_{sh}^* = 0,3 (sh_c f'_c / f_{yh}) [(A_g / A_{ch}) - 1]$$

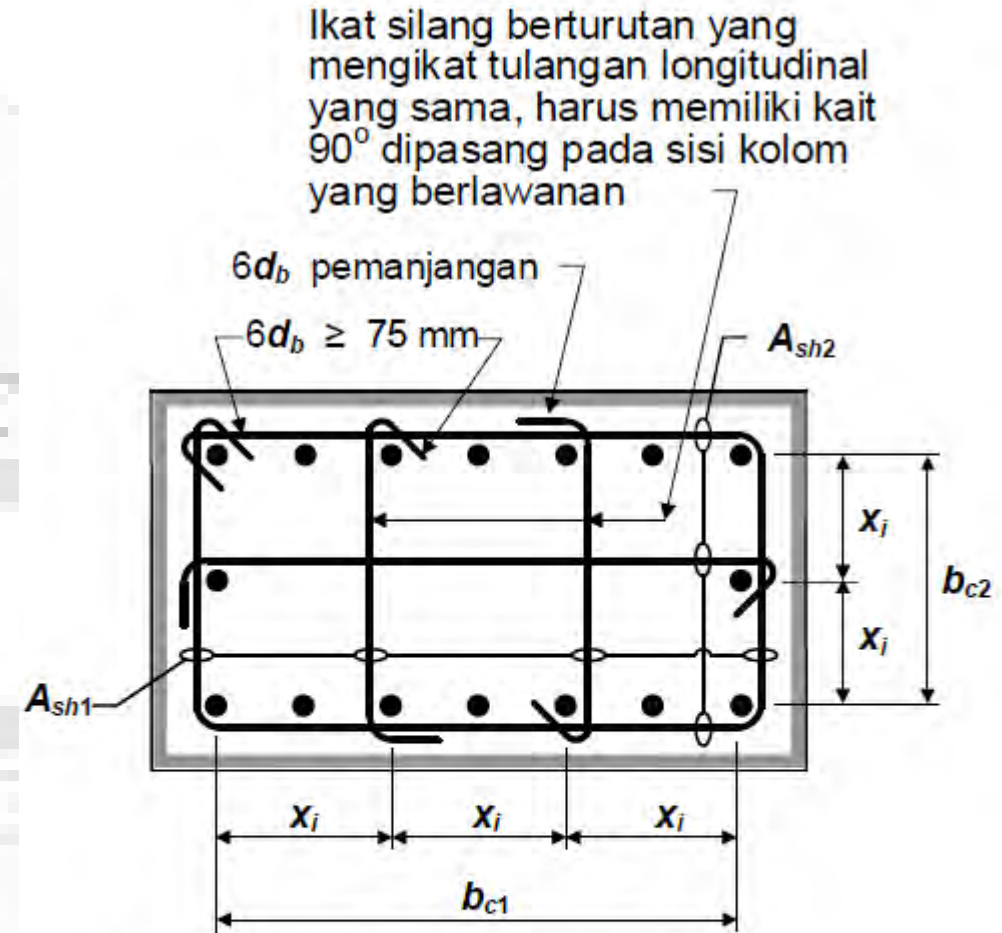
$$A_{sh} = 0,09 (sh_c f'_c / f_{yh})$$

- Tidak perlu diperhatikan bilamana bagian inti penampang telah direncanakan terhadap kombinasi beban gempa.

Tulangan sengkang kolom; **desain biasa**

Sumber: SNI 2847:2019

R18.7.5.2 Bagian 18.7.5.2 dan 18.7.5.3 memberikan persyaratan untuk konfigurasi tulangan transversal untuk kolom dan *joint* dari sistem rangka pemikul momen khusus. Gambar R18.7.5.2 menunjukkan contoh tulangan transversal yang disediakan oleh satu sengkang pengekuat dan tiga ikat silang (*crossties*). Ikat silang dengan kait 90 derajat tidak seefektif ikat silang dengan kait 135 derajat ataupun sengkang pengekuat dalam memberikan pengekuatan. Untuk nilai $P_u/A_g f_c'$ yang rendah dan kekuatan tekan beton yang rendah, ikat silang dengan kait 90-derajat cukup memadai apabila ujung kaitnya dipasang selang-seling sepanjang kolom dan di sekeliling kolom.



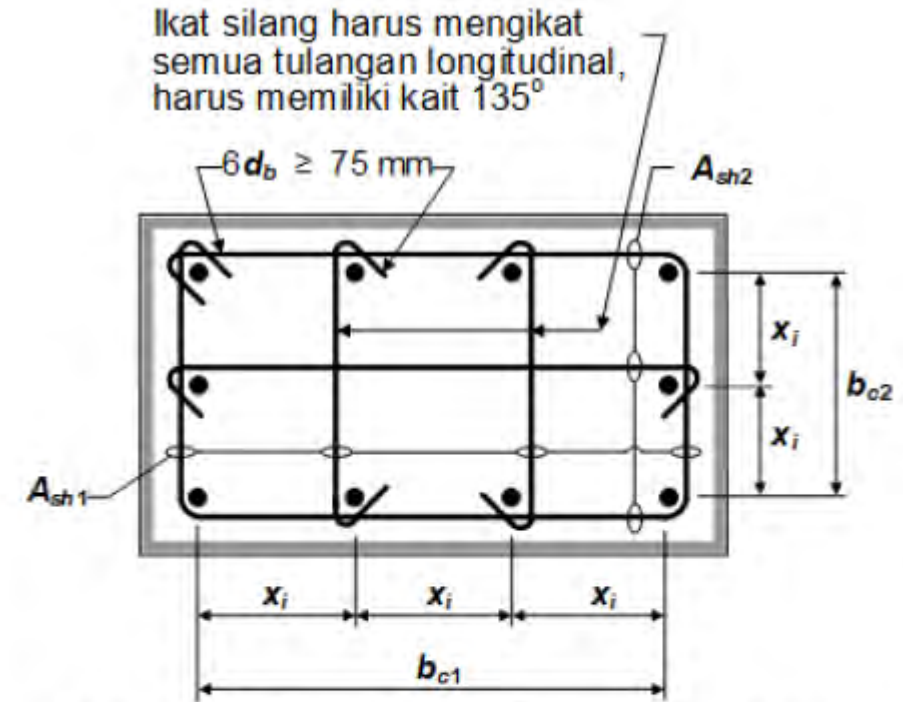
Dimensi x_i antara sumbu-sumbu penampang tulangan longitudinal yang ditopang secara lateral tidak melebihi 350 mm. Nilai h_x dalam Pers. (18.7.5.3) diambil sebagai nilai terbesar dari x_i .

Gambar R18.7.5.2 – Contoh penulangan transversal pada kolom

Tulangan sengkang kolom; desain seismik di sendi plastis

Sumber: SNI 2847:2019

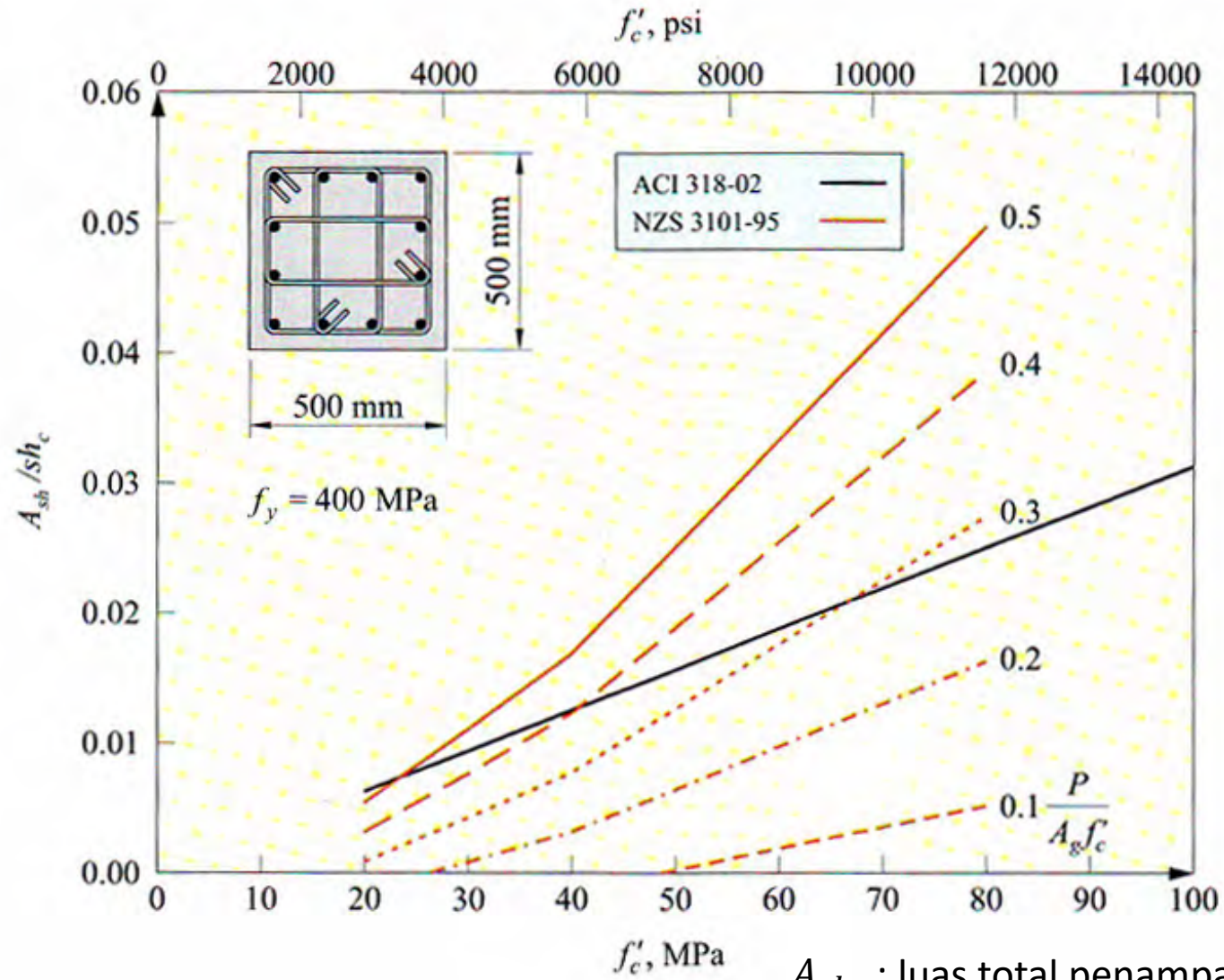
Untuk nilai $P_u/A_g f_c'$ yang lebih tinggi, dimana diharapkan terjadi perilaku yang terkontrol tekan (*compression controlled behavior*), dan untuk kekuatan tekan yang tinggi, dimana perilaku kolom cenderung lebih getas, peningkatan pengekangan yang disediakan dengan memiliki sudut dengan sengkang tertutup (*hoop*) atau kait seismik yang mendukung semua tulangan longitudinal adalah sangat penting untuk mencapai kinerja yang diinginkan. Apabila kondisi ini berlaku, diperlukan ikat silang dengan kait seismik di kedua ujungnya. Batasan spasi sebesar 200 mm pada h_x juga dimaksudkan untuk meningkatkan kinerja pada kondisi kritis.



Dimensi x_i antara sumbu-sumbu penampang tulangan longitudinal yang ditopang secara lateral tidak melebihi 200 mm. Nilai h_x dalam Pers. (18.7.5.3) diambil sebagai nilai terbesar dari x_i .

Gambar R18.7.5.2 f) – Contoh penulangan transversal pada kolom dengan $P_u > 0,3A_g f_c'$ atau $f_c' > 70 \text{ Mpa}$

Pengaruh mutu beton terhadap A_{sh}



A_{sh} : luas total penampang sengkang tertutup persegi
 h_c : tinggi penampang kolom
 s : spasi sengkang



Referensi

- ACI Committee 318, (2014): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2019): *SNI 2847:2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Bayrak, O. dan Sheikh, S.A., (2004): *Seismic Performance of High Strength Concrete Columns Confined with High Strength Steel, 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 1181.
- Earthquake Image Information System (EIIIS): Karl V. Steinbrugge Collection NISEE University of California, Berkeley.
- Earthquake Image Information System (EIIIS): William G. Godden Collection NISEE University of California, Berkeley.
- Imran, I., dan Budiono, B. (2014): *Materi kuliah program pascasarjana mata kuliah Perilaku Struktur Beton*, Institut Teknologi Bandung.
- Imran, I. dan Zulkifli, E., (2014): *Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Imran, I. dan Hendrik, F., (2014): *Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Jennings, P.C., (1971): *Engineering features of the San Fernando earthquake of February 9, 1971*, California Institute of Technology, EERL-71-02
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1984). "Seismic design of bridge piers." Research Report No. 84-2, Univ. of Canterbury, New Zealand.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., (1988): *Theoretical stress-strain model for confined concrete*, *J. Struct Eng.*, 114: 1804–1826.
- Nawy, E. G., (2009): *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*, 6th edition, Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Ozcebe, G. dan Saatcioglu, M., (1987): *Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading*, *Structural Journal*, Vol. 84: 4, pp. 308-315.
- Park, R. dan Paulay, T., (1975): *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.
- Paulay, T. dan Priestly, M.J.N, (1992): *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Willey & Sons.
- Paultre, P. dan Légeron, F., (May 2008): *Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns*, *Journal of Structural Engineering*, Volume 134 Issue 5.
- Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928). "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses." Bulletin 185, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign, 111.
- Wight, J. K., (2016): *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 7th ed., Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Wu, T., Wei, H., Zhang, Y., dan Liu, X., (2018): *Axial compressive behavior of lightweight aggregate concrete columns confined with transverse steel reinforcement*, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 10(3) 1–14.
- http://db.world-housing.net/pdf_view/111/; diakses tanggal 5 Februari 2020.



TKS 330118

Perilaku dan Desain Struktur Beton Lanjut

Program Magister Teknik Sipil, Rekayasa Struktur
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Available on: <http://bit.ly/S2StrukturBetonLanjut>

Teori balok elastik

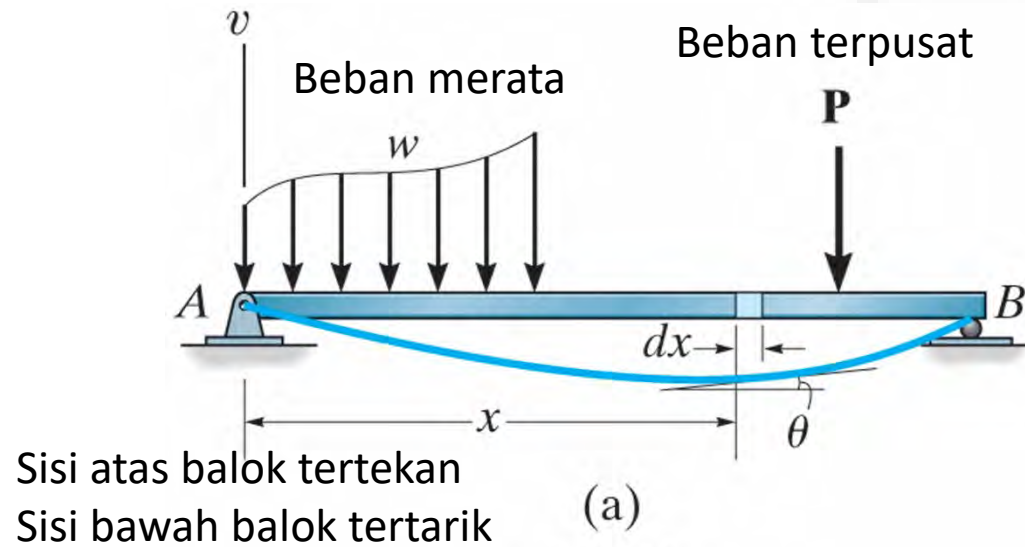
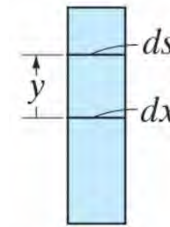


Figure: 08-07A

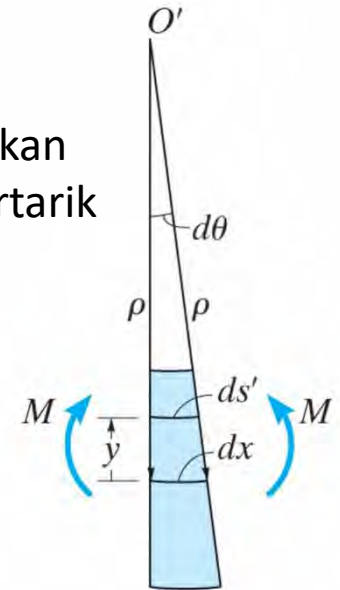
Copyright © 2009 Pearson Prentice Hall, Inc.

Balok di atas dua tumpuan

Sisi atas balok tertekan
Sisi bawah balok tertarik



before deformation



after deformation

(b)

Figure: 08-07B

Copyright © 2009 Pearson Prentice Hall, Inc.

dengan:

ρ : radius kelengkungan (*curvature*) di titik tertentu pada kurva elastik (mm)

$\frac{1}{\rho}$: kelengkungan (*curvature*) (mm^{-1})

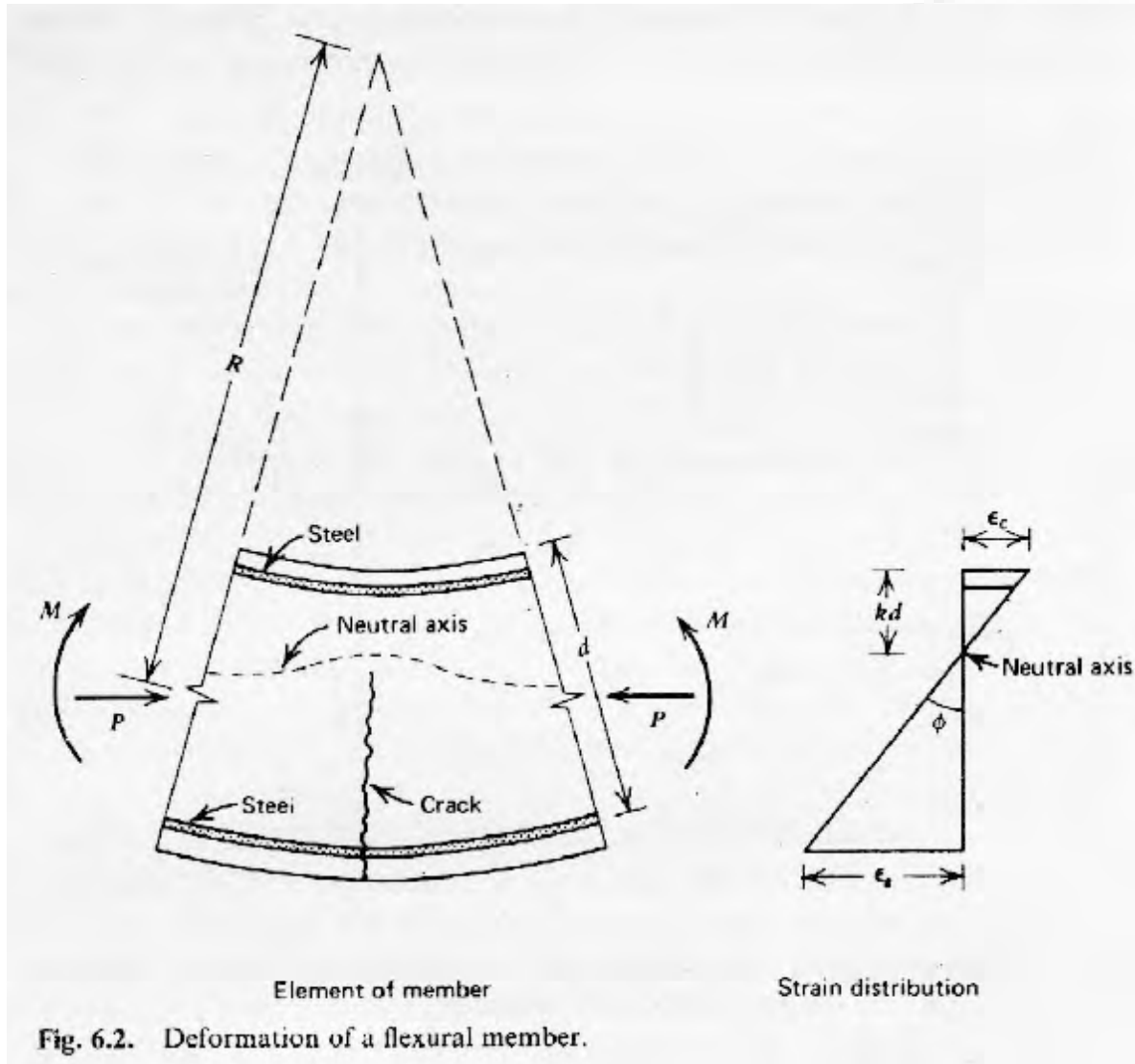
M : momen yang terjadi pada balok pada lokasi radius kelengkungan (N)

E : modulus elastisitas material (MPa atau N/mm^2)

I : momen inersia balok yang dihitung pada sumbu netral (mm^4)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

Hubungan momen-kelengkungan (*moment-curvature*)



$$\frac{dx}{R} = \frac{\epsilon_c dx}{kd} = \frac{\epsilon_s dx}{d(1-k)}$$

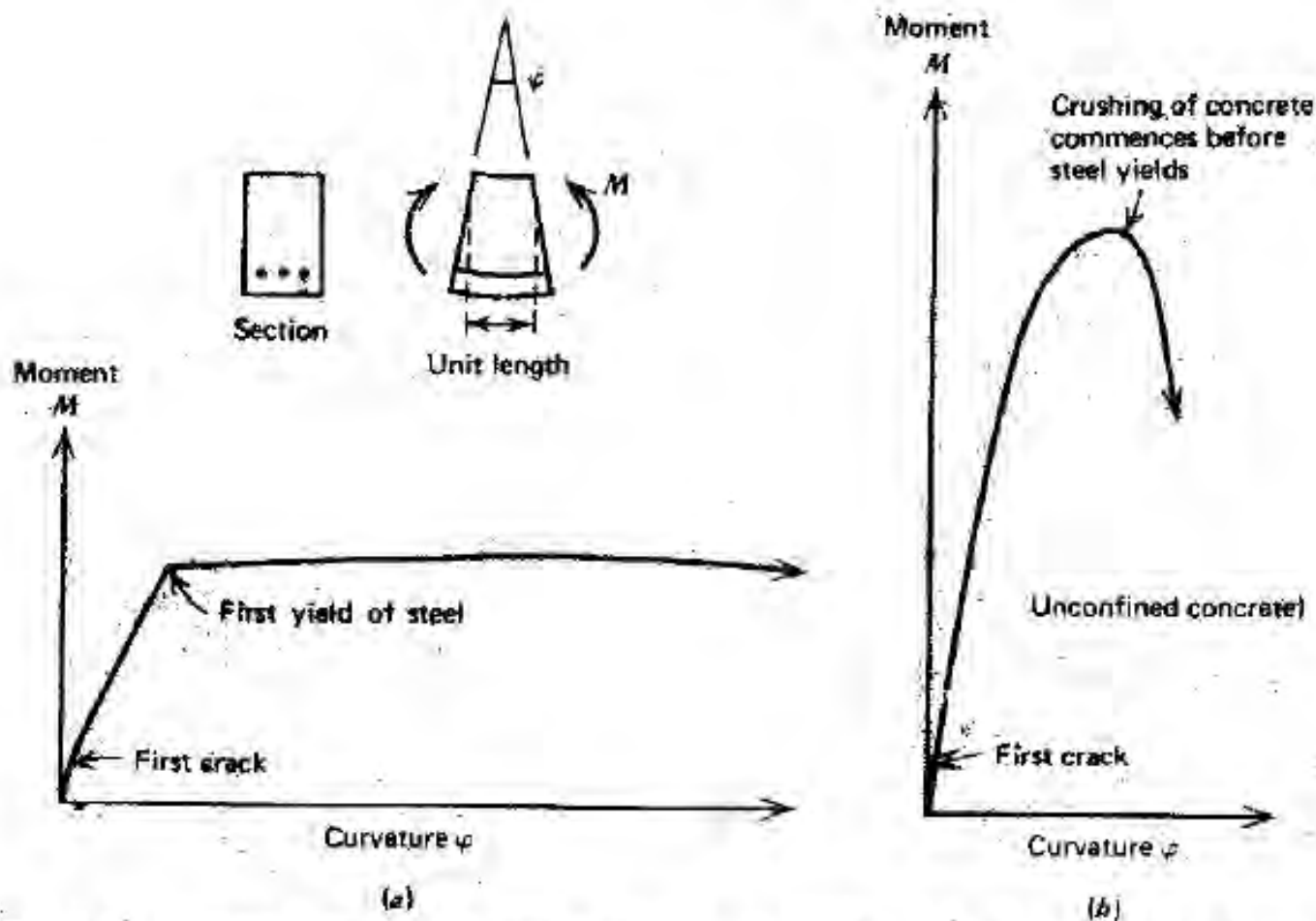
Maka $\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)}$

Persamaan kelengkungan (*curvature*) elemen adalah rotasi per panjang unit *member* (contoh: balok, kolom):

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \quad (6.1)$$

Kelengkungan adalah kemiringan (*gradient*) regangan elemen.

Hubungan momen-kelengkungan (*moment-curvature*)

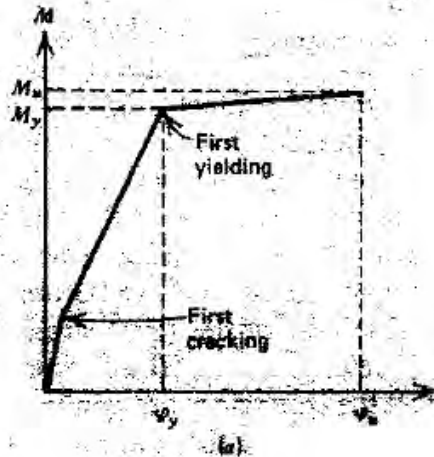


Hubungan momen-kelengkungan dan modulus elastisitas:

$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \quad (6.2)$$

Fig. 6.3. Moment-curvature relationships for singly reinforced beam sections. (a) Section failing in tension, $\rho < \rho_b$. (b) Section failing in compression, $\rho > \rho_b$.

Kurva tegangan-regangan penampang beton bertulang



Bentuk kurva hubungan momen-kelengkungan balok yang tulangan bajanya leleh dapat diidealisasikan menjadi kurva trilinear [Fig. 6.4. (a)].

Bagian pertama: dari kondisi beban = 0 sampai dengan retak.
Bagian kedua: kondisi retak sampai dengan leleh.

Bagian ketiga: kondisi leleh sampai dengan batas (*ultimate*)

Setelah retak, kurva momen-kelengkungan dari sejak beban = 0 hampir linier dengan kondisi saat leleh, sehingga disederhanakan menjadi kurva bilinear [Fig. 6.4. (b) dan (c)] yang akurat untuk balok yang mengalami retak awal.

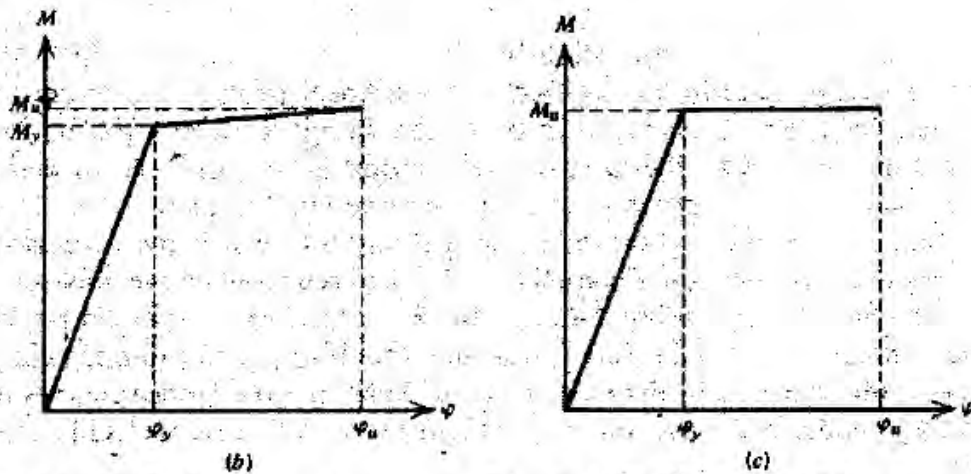


Fig. 6.4. Idealized moment-curvature curves for a singly-reinforced section failing in tension.

Kurva tegangan-regangan baja dan beton; gaya tarik baja

Fig. 6.5 (a) dan (b): Kurva hubungan tegangan-regangan baja dan beton dengan:

f_y : tegangan (kuat) leleh baja tulangan

f'_c : kekuatan tekan silinder beton

f_c'' : kekuatan tekan beton dan $k_3 = f_c'' / f'_c$

Fig. 6.5 (c): potongan penampang beton dengan beban aksial (P) dan momen (M) dengan:

d : tinggi penampang efektif

kd : tinggi sumbu netral

ϵ_{cm} : regangan tekan maksimum

$\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}, \epsilon_{s3}, \dots$: regangan baja pada baris ke- i

$f_{s1}, f_{s2}, f_{s3}, \dots$: tegangan baja pada baris ke- i

S_1, S_2, S_3, \dots : gaya tarik baja pada baris ke- i

$$\epsilon_{si} = \epsilon_{cm} \frac{kd - d_i}{kd} \quad (6.3)$$

$$S_i = f_{si} A_{si} \quad (6.4)$$

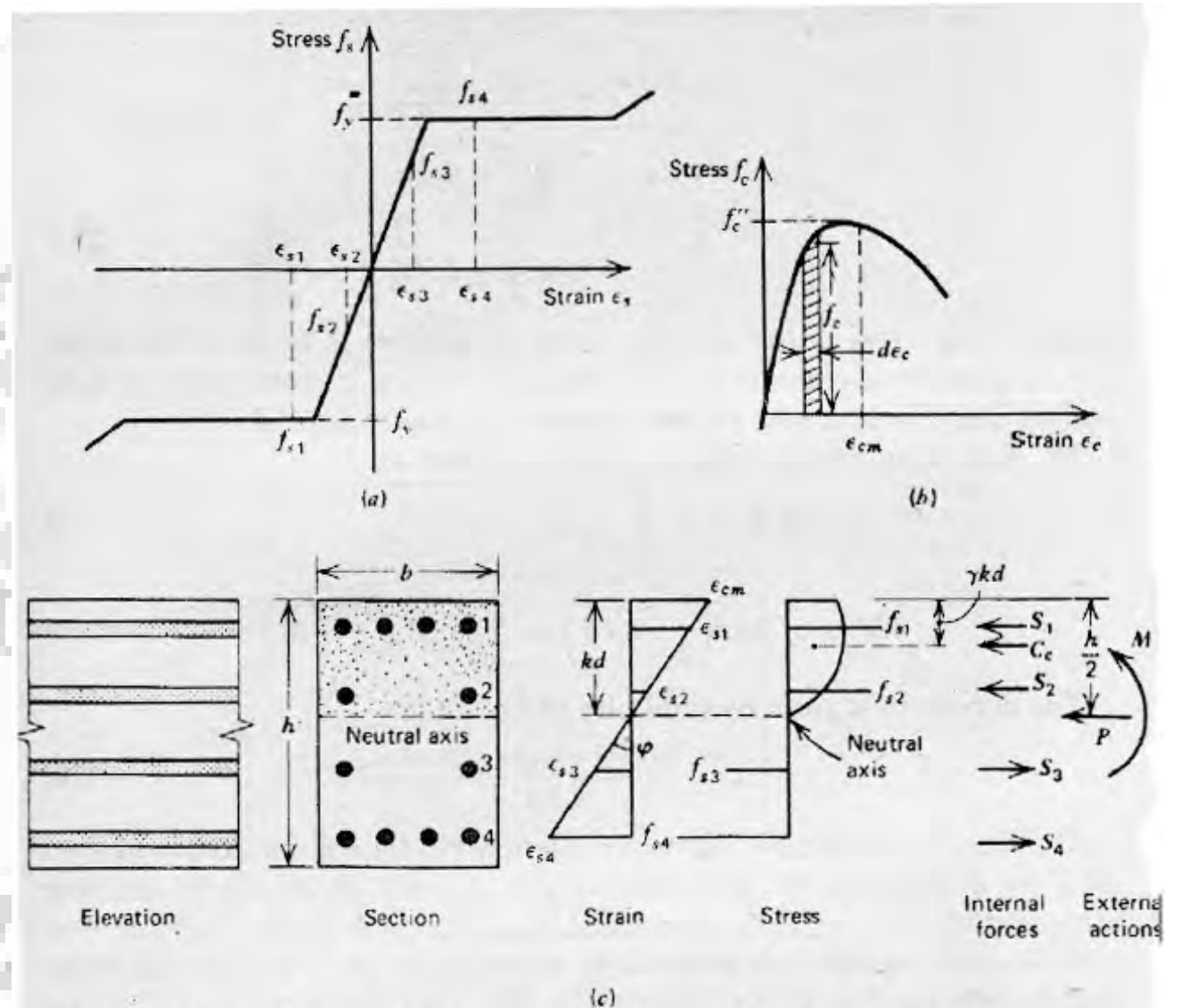


Fig. 6.5. Theoretical moment-curvature determination. (a) Steel in tension and compression. (b) Concrete in compression. (c) Section with strain, stress, and force distribution.

Sumber: Park dan Paulay (1975)

Kurva tegangan-regangan baja dan beton; gaya tekan beton

$$C_c = \alpha f_c'' b kd \quad (6.5)$$

Berlokasi pada jarak γkd dari serat yang mengalami regangan tekan maksimum (ϵ_{cm}).

C_c : gaya tekan beton

α : faktor rata-rata tegangan

γ : faktor penengah (*centroid*)

Dari Fig. 6.5 (b):

Luas area di bawah kurva tegangan-regangan = $\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c = \alpha f_c'' \epsilon_{cm}$, maka $\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c}{f_c'' \epsilon_{cm}}$ (6.6)

Momen pertama area dekat area di bawah kurva tegangan-regangan = $\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c \epsilon_c d\epsilon_c = (1 - \gamma) \epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c$

maka $\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c \epsilon_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c}$ (6.7)

Sehingga jika tegangan beton (f_c) dinyatakan dalam regangan beton (ϵ_c) dan terdapat data kurva tegangan-regangan beton, gaya tekan beton dan lokasinya dapat diperoleh dari persamaan (6.5) s.d. (6.7).

ILMU ALAT PENGABDIAN

Kurva tegangan-regangan baja dan beton; gaya dalam tekan dan momen

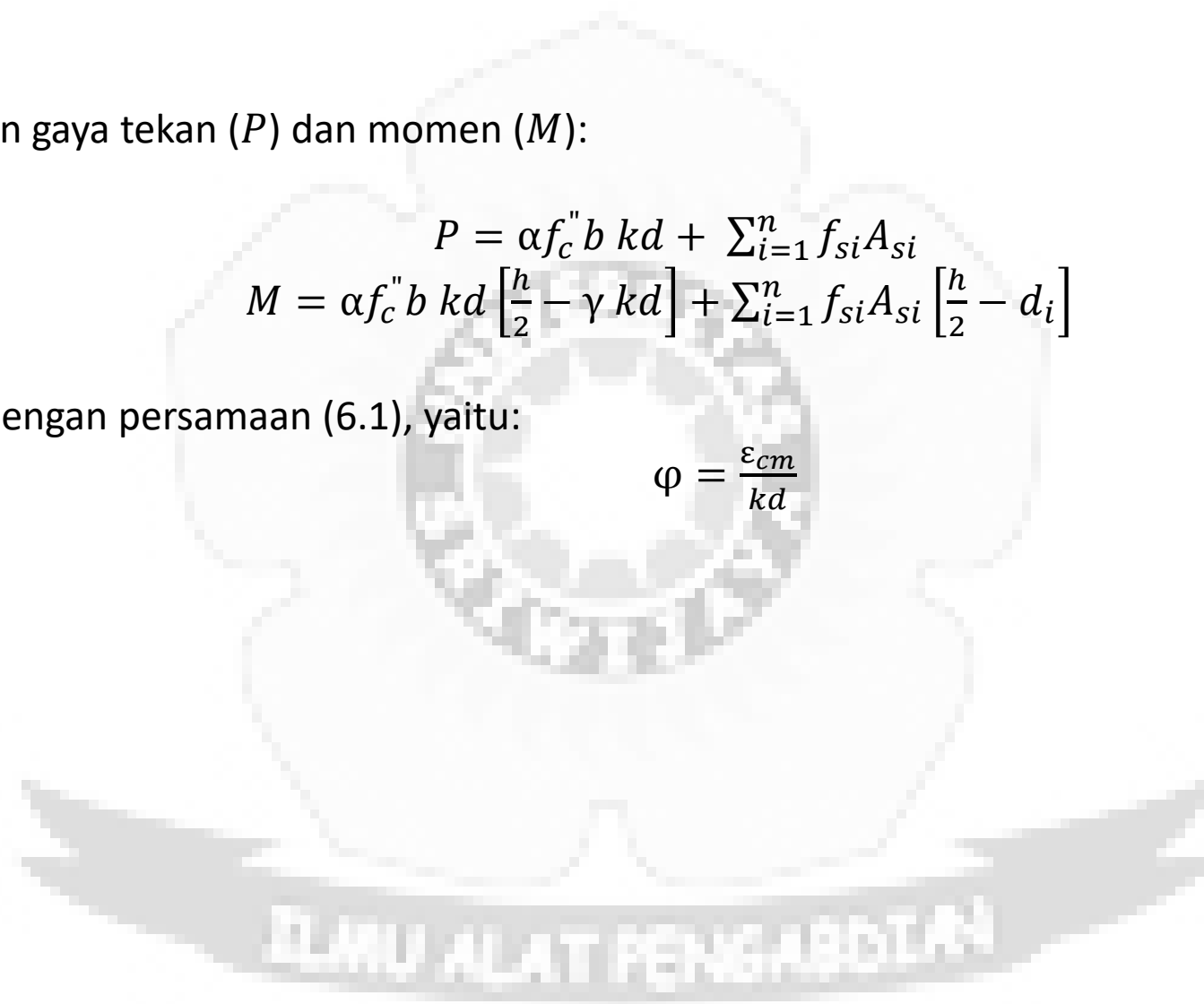
Persamaan-persamaan gaya tekan (P) dan momen (M):

$$P = \alpha f_c'' b k d + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} \quad (6.8)$$

$$M = \alpha f_c'' b k d \left[\frac{h}{2} - \gamma k d \right] + \sum_{i=1}^n f_{si} A_{si} \left[\frac{h}{2} - d_i \right] \quad (6.9)$$

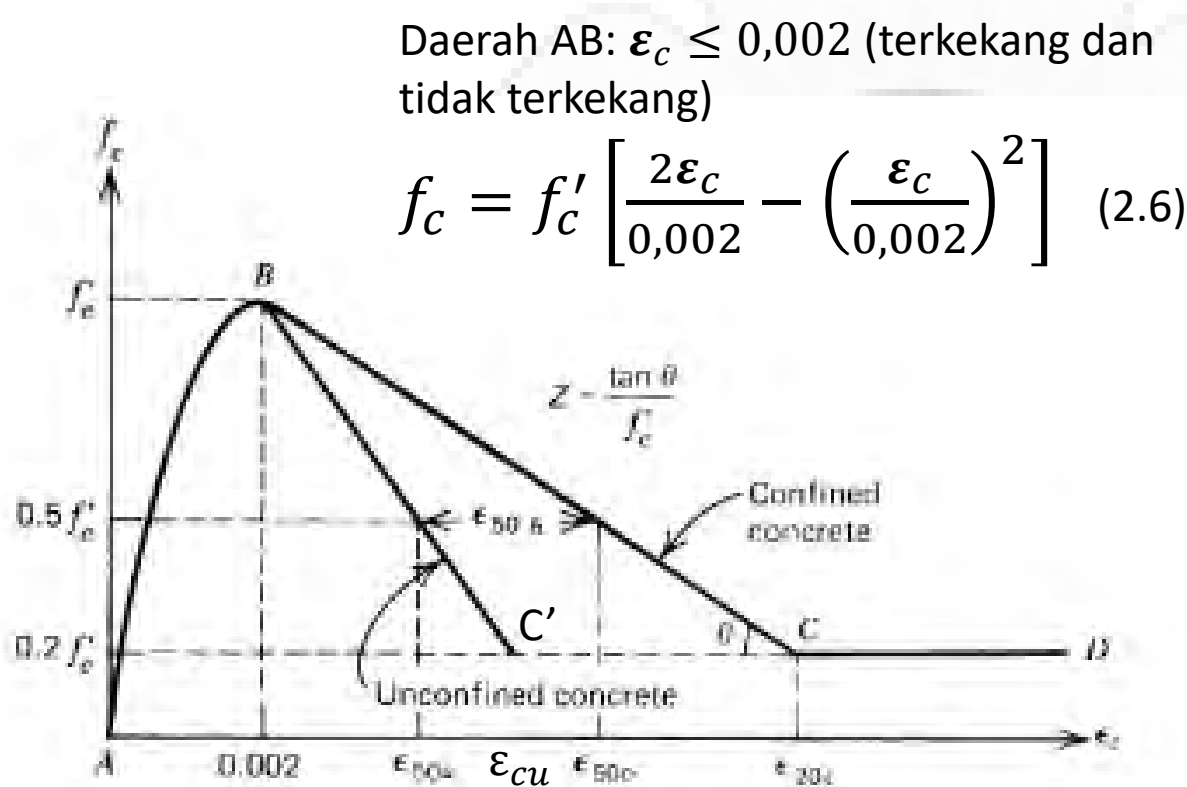
Kelengkungan sama dengan persamaan (6.1), yaitu:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cm}}{k d} \quad (6.10)$$



Kurva tegangan-regangan beton

Beton yang dikekang (*confined*) dengan sengkang kotak mencapai regangan *ultimate* (saat tegangan beton $0,2 f'_c$) yang lebih kecil daripada beton yang tidak terkekang (*unconfined*).



Daerah AB: $\epsilon_c \leq 0,002$ (terkekang dan tidak terkekang)

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Daerah BC: $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$ (terkekang)

$$f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon_c - 0,002)] \quad (2.7)$$

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0,002} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 f'_c}{f'_c - 1000} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (2.10)$$

Daerah CD: $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$ (terkekang)

$$f_c = 0,2 f'_c \quad (2.11)$$

Fig. 2.18. Stress-strain curve for concrete confined by rectangular hoops, Kent and Park. ^{2.24}

f'_c : kekuatan tekan silinder beton dalam satuan psi; 1 psi = 0,00689 MPa (N/mm²)

Kurva tegangan-regangan beton

Daerah BC': $0,002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ (tidak terkekang)

$$f_c = f'_c [1 - 100(\varepsilon_c - 0,002)]$$

$$\rho_s = \frac{\left(\frac{1}{4} \pi \phi_s^2\right) [2(b'' + h'')]}{b'' h'' s_h}$$

[dari Fig.6.6, Park dan Paulay (1975)]

Keterangan:

f'_c : kekuatan tekan silinder beton dalam satuan psi; 1 psi = 0,00689

ρ_s : perbandingan volume tulangan transversal (sengkang) dengan volume inti beton yang diukur sampai dengan sisi luar tulangan sengkang

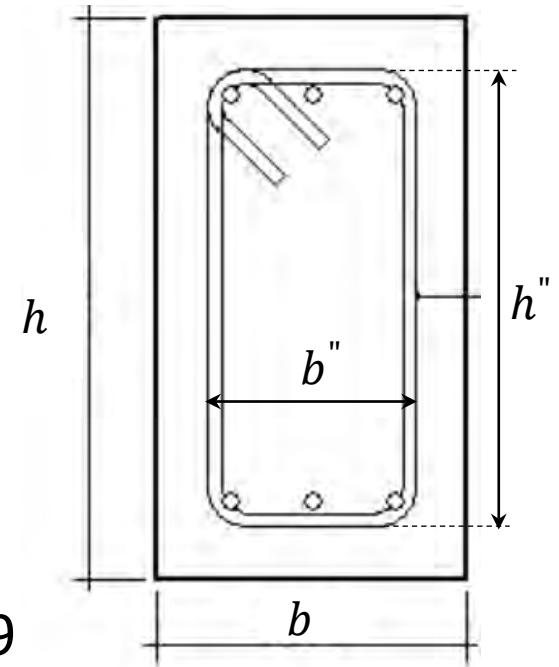
ϕ_s : diameter tulangan sengkang (mm)

b'' : lebar inti beton terkekang yang diukur sampai sisi terluar tulangan sengkang (mm)

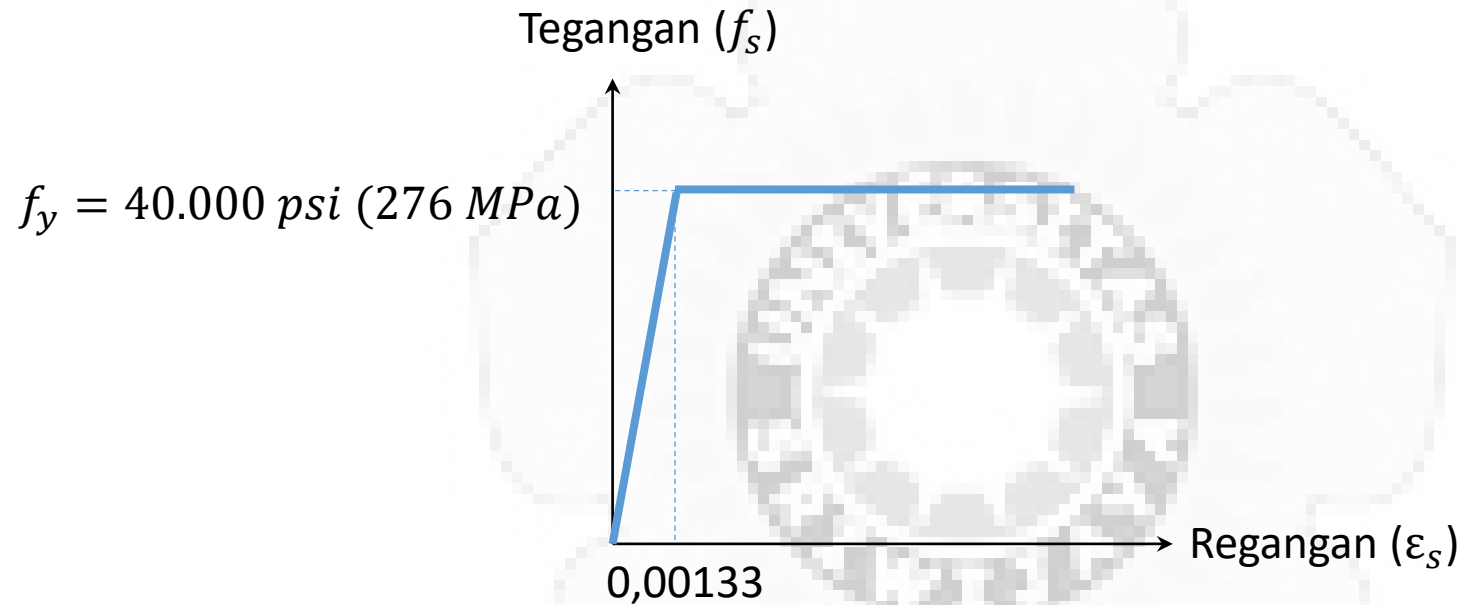
h'' : tinggi inti beton terkekang yang diukur sampai sisi terluar tulangan sengkang (mm)

s_h : spasi tulangan sengkang (mm)

Z : parameter yang mendefinisikan kemiringan cabang turun linier pada kurva tegangan-regangan beton



Kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan



Kurva tegangan-regangan baja (asumsi)

Pengaruh luas tulangan tarik dan tekan pada kelengkungan

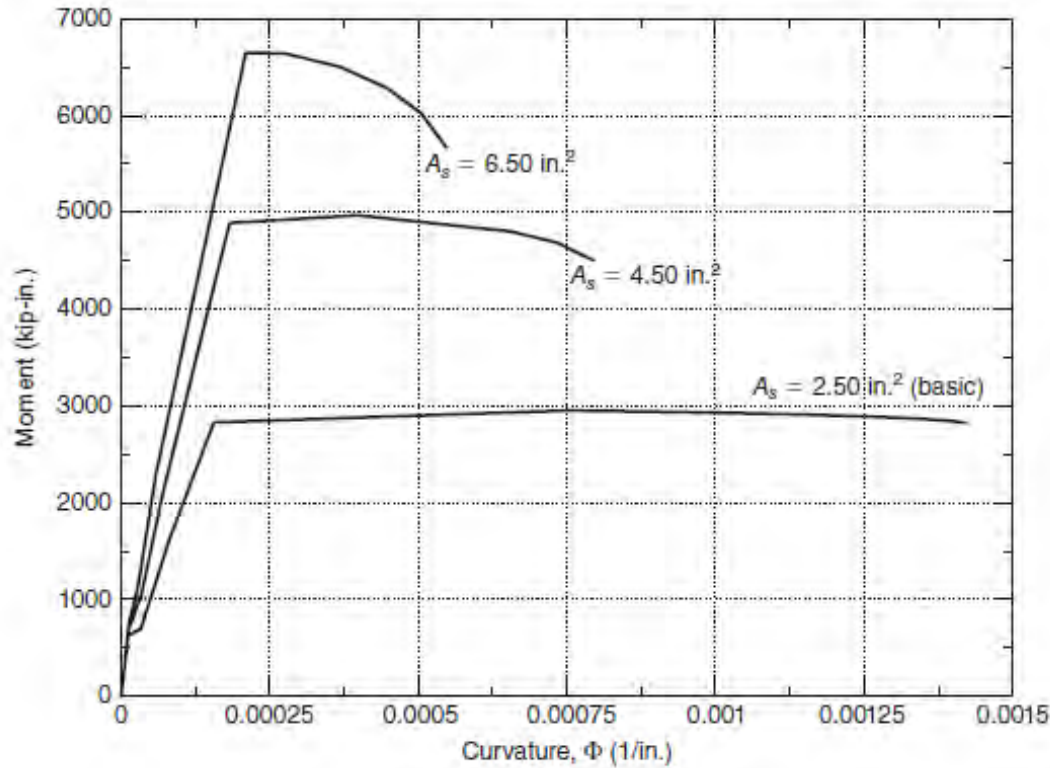


Fig. 4-11
Effect of increasing tension steel area, A_s .

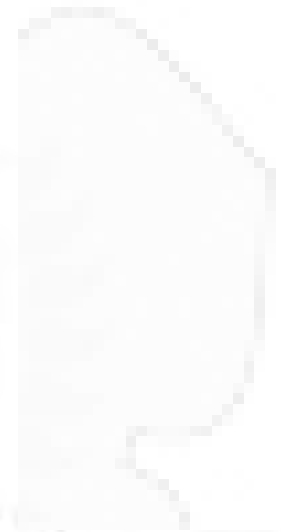
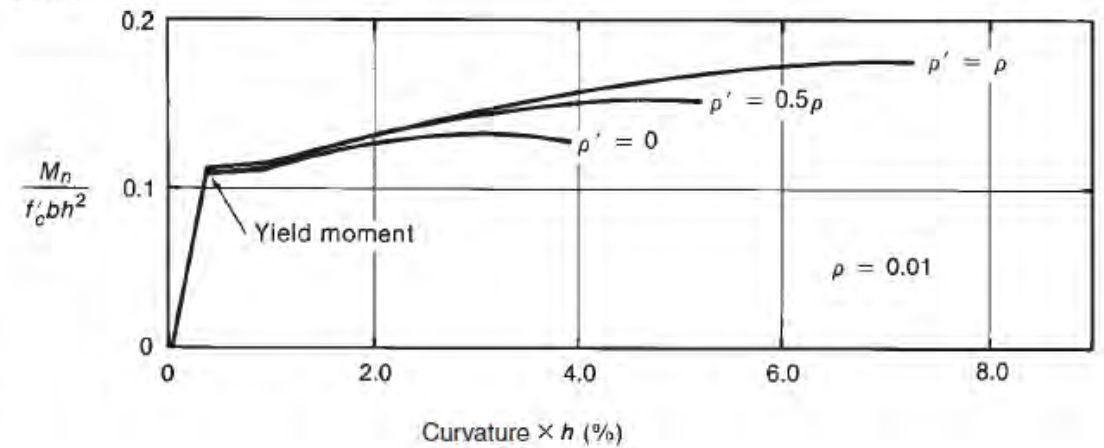


Fig. 4-31
Effect of compression reinforcement on strength and ductility of under-reinforced beams. (From [4-16].)



Pengaruh perubahan kualitas material dan dimensi penampang terhadap kelengkungan

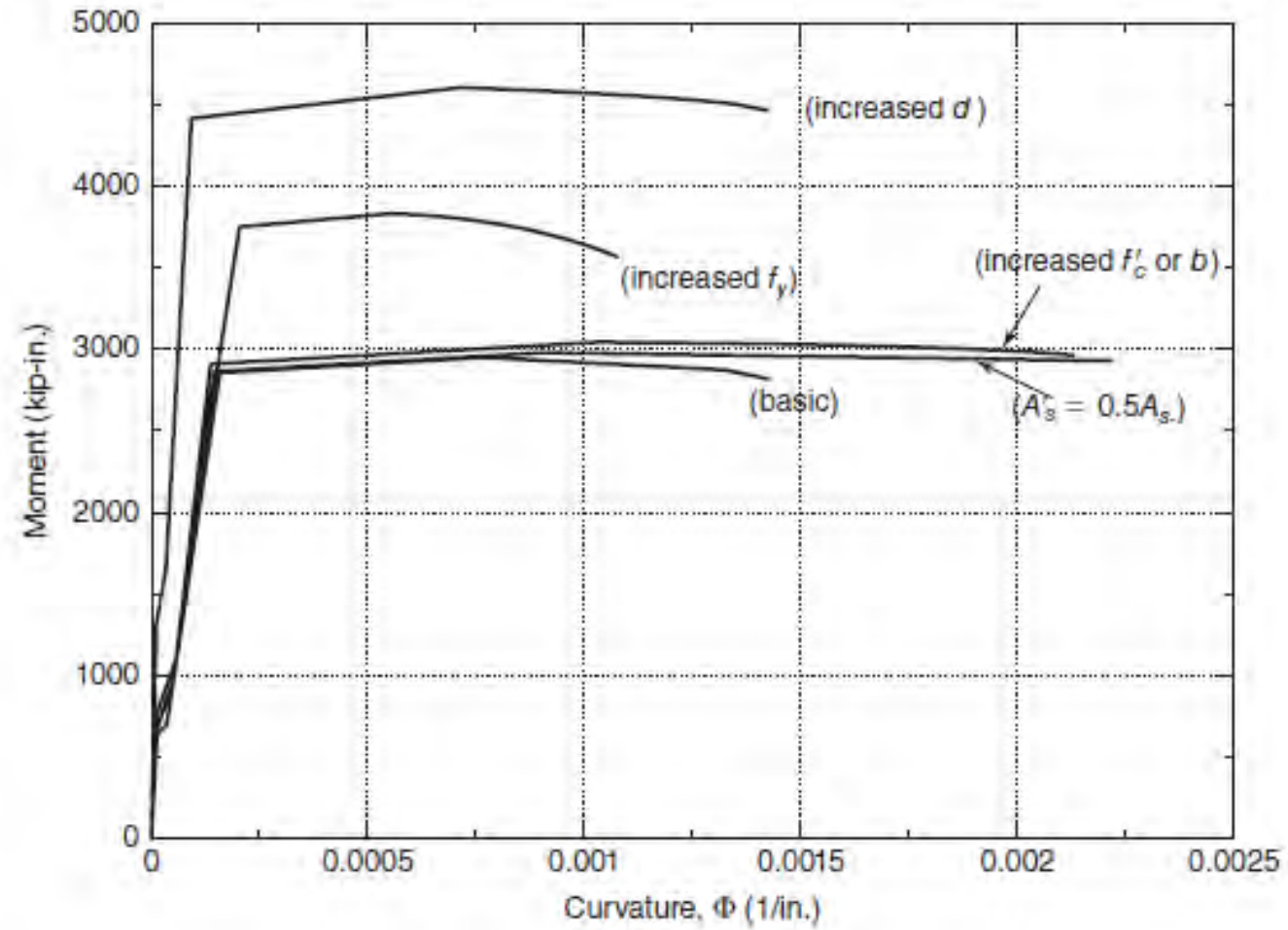


Fig. 4-12
Effect of increasing f_y , d , f'_c ,
 b , and A'_s .

Hubungan momen-kelengkungan (*moment-curvature*)

Kurva memperlihatkan bahwa pada saat regangan beton maksimum tercapai:

- daktilitas penampang menurun jika luas tulangan baja bertambah
- daktilitas penampang naik signifikan karena penambahan luas tulangan tekan

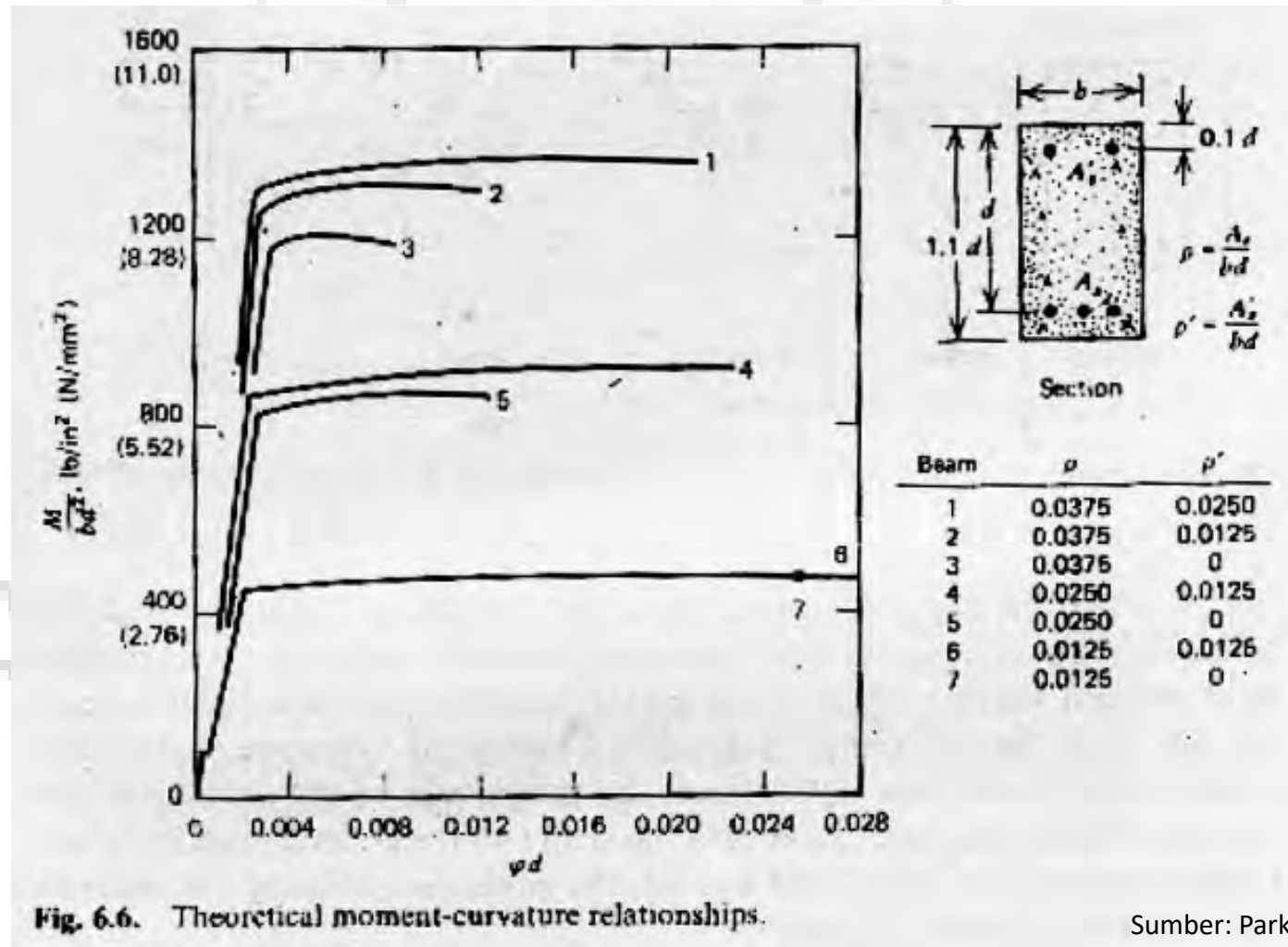


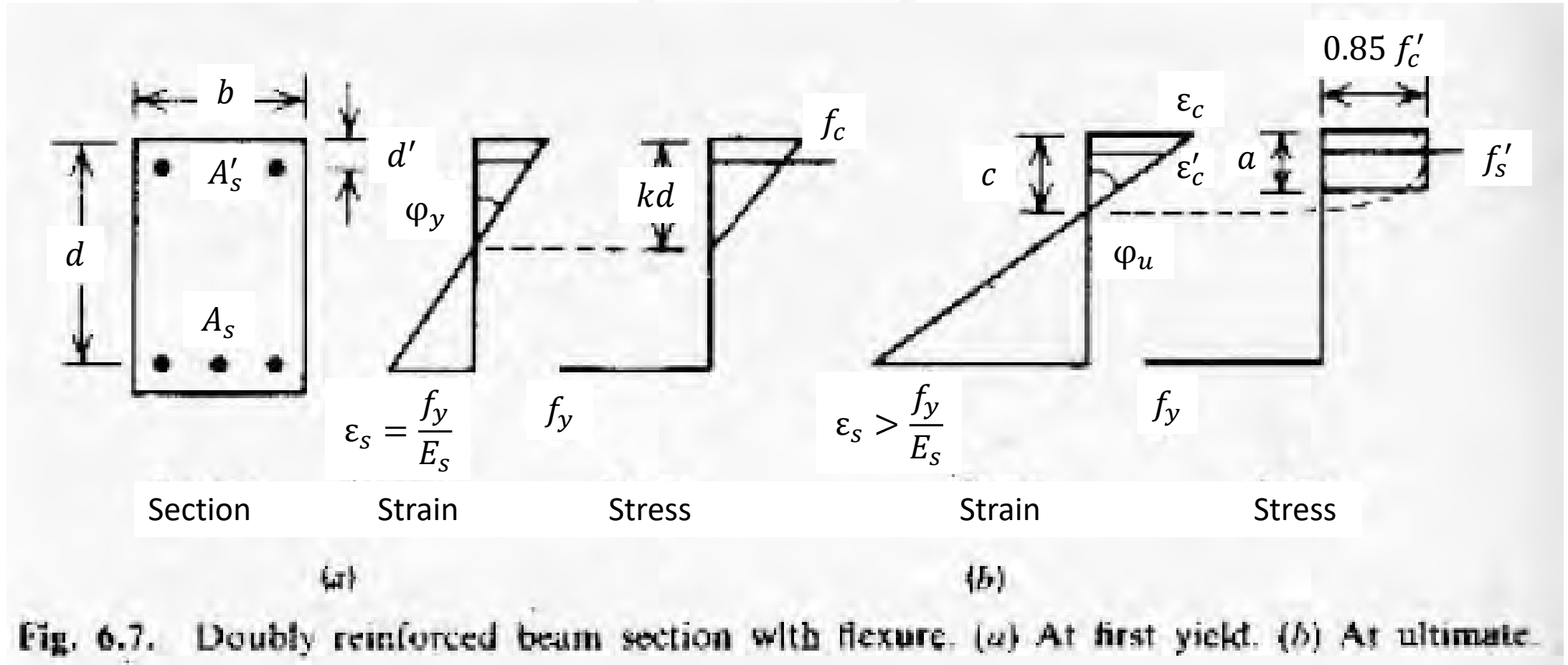
Fig. 6.6. Theoretical moment-curvature relationships.

Sumber: Park dan Paulay (1975)



Momen-kelengkungan pada balok bertulangan ganda

Kelengkungan pada kondisi leleh dan batas (*ultimate*)



Kelengkungan pada kondisi leleh dan batas (*ultimate*)

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n \quad (6.11)$$

$$M_u = A_s f_y j d \quad (6.12)$$

$$\phi_r = \frac{f_y / E_s}{d(1 - k)} \quad (6.13)$$

$$a = \frac{A_s f_y - A'_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (6.14)$$

$$M_u = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (6.15)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \beta_1}{a} \quad (6.16)$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) \quad (6.17)$$

$$\epsilon_c \left[1 - \beta_1 d' \left(\frac{0.85 f'_c b}{A_s f_y - A'_s f_y} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (6.18)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{a}{d} \right)^2 + \frac{a}{d} \left(\frac{\rho' \epsilon_c E_s - \rho f_y}{1.7 f'_c} \right) - \frac{\rho' \epsilon_c E_s \beta_1 d'}{1.7 f'_c d} = 0 \quad (6.19)$$

$$M_u = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s E_s \epsilon_c \frac{a - \beta_1 d'}{a} (d - d') \quad (6.20)$$

dengan:

A_s : luas tulangan tarik

A'_s : luas tulangan tekan

b : lebar penampang

d : tinggi efektif penampang

d' : jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan tekan

E_c : modulus elastisitas beton

E_s : modulus elastisitas baja

f_y : tegangan (kekuatan) leleh baja tulangan

f'_c : tegangan (kekuatan) tekan beton

$j d$: lengan momen; jarak dari gaya tekan beton dan baja tulangan tekan ke gaya tarik

$$n = \frac{E_s}{E_c}; \rho = \frac{A_s}{bd}; \rho' = \frac{A'_s}{bd}$$

Kelengkungan pada kondisi leleh dan batas (*ultimate*)

Daktalitas kelengkungan:

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_r}{f_y/E_s} \frac{d(1-k)}{a/\beta_1} \quad (6.21)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{0.85\beta_1 E_s \varepsilon_c f'_c}{f_y^2 (\rho - \rho')} \left\{ 1 + (\rho + \rho')n - \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right)n \right]^{1/2} \right\} \quad (6.22)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\beta_1 E_s \varepsilon_c}{f_y} \frac{1 + (\rho + \rho')n - \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right)n \right]^{1/2}}{\left[\left(\frac{\rho' \varepsilon_c E_s - \rho f_y}{1.7 f'_c} \right)^2 + \frac{\rho' \varepsilon_c E_s \beta_1 d'}{0.85 f'_c d} \right]^{1/2} - \frac{\rho' \varepsilon_c E_s - \rho f_y}{1.7 f'_c}} \quad (6.23)$$

Example 6.1

A reinforced concrete beam has a rectangular cross section of width 10 in (254 mm) and overall depth 25 in (635 mm). The tension steel is four No. 8 (25.4 mm diameter) bars and the compression steel is two No. 8 (25.4 mm diameter) bars, all placed with 2 in (51 mm) of cover to the steel centroid. The concrete has a cylinder strength of 3000 psi (20.7 N/mm²), a modulus of rupture of 410 psi (2.83 N/mm²), and a modulus of elasticity of 3.2×10^6 psi (22,070 N/mm²). The steel has a yield strength of 40,000 psi (276 N/mm²) and a modulus of elasticity of 29×10^6 psi (200,000 N/mm²). Calculate the moment and curvature (1) at just prior to cracking of the concrete, (2) at first yield of the tension steel, and (3) when the concrete reaches an extreme fiber compression strain of 0.004. Construct the approximate trilinear moment-curvature curve for the section.

Solution

Steel proportions:

$$A_s = 3.16 \text{ in}^2 (2039 \text{ mm}^2) \quad \therefore \rho = \frac{3.16}{10 \times 23} = 0.01374$$

$$A'_s = 1.58 \text{ in}^2 (1019 \text{ mm}^2) \quad \therefore \rho' = \frac{1.58}{10 \times 23} = 0.00687$$

Contoh soal

1. Before cracking (see Fig. 6.11b)

The section may be analyzed using elastic theory and the transformed section (see Section 10.2.4).

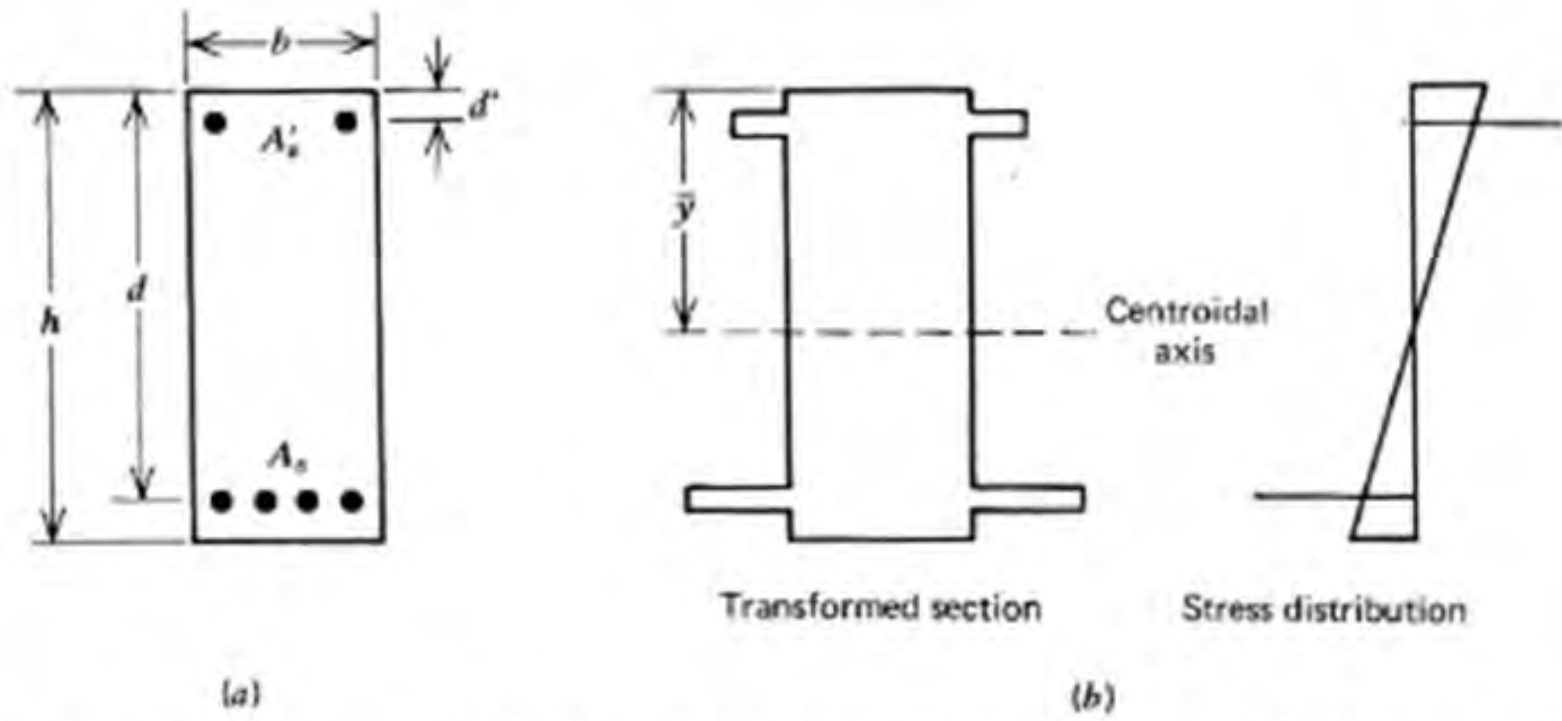


Fig. 6.11. Example 6.1. (a) Section. (b) Before cracking: elastic behavior. (c) After cracking: at first yield. (d) After cracking: at ultimate. (e) Moment-curvature curve.

Contoh soal

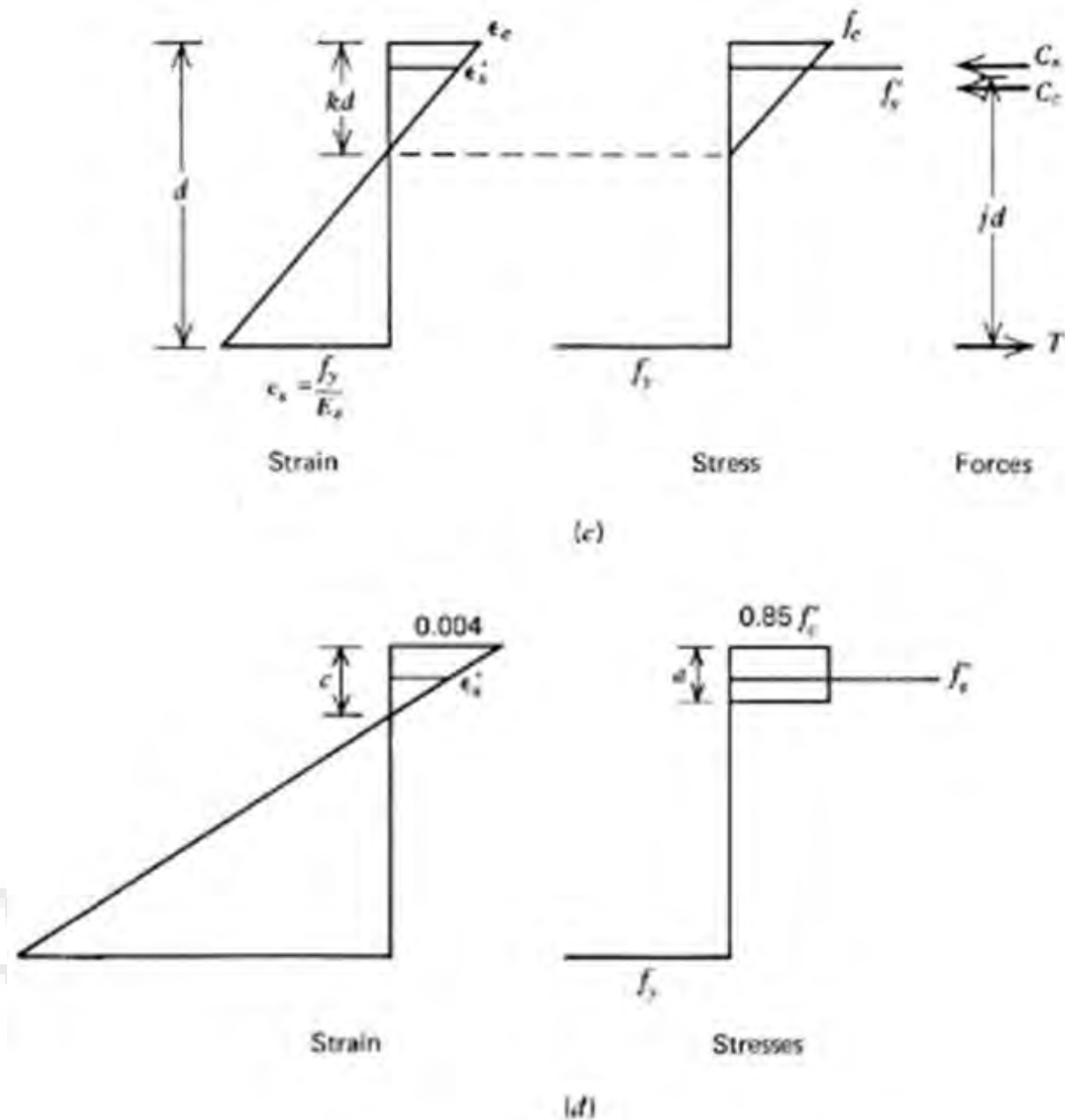


Fig. 6.11. Example 6.1. (a) Section. (b) Before cracking: elastic behavior. (c) After cracking: at first yield. (d) After cracking: at ultimate. (e) Moment-curvature curve.

Contoh soal

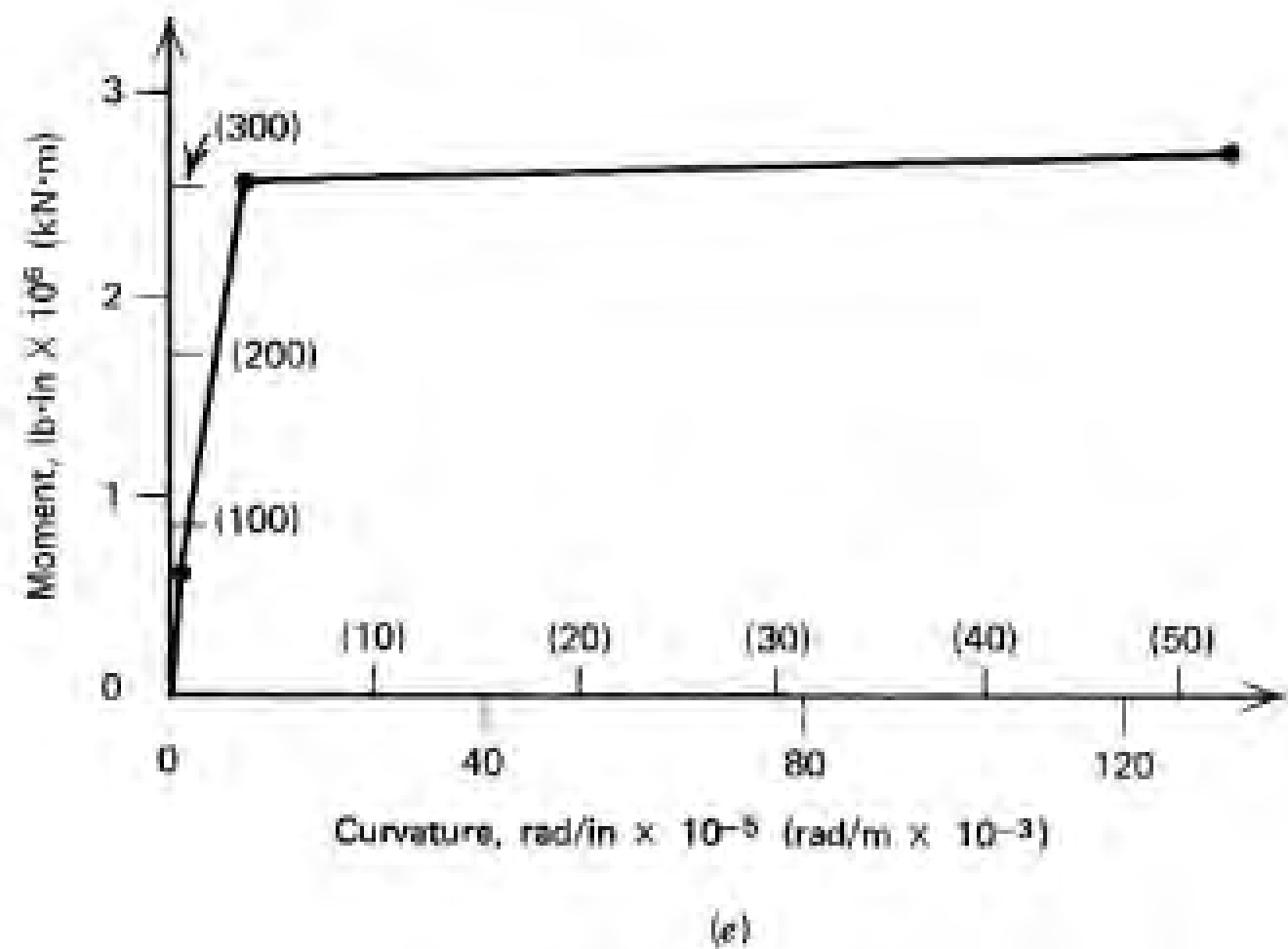


Fig. 6.11. Example 6.1. (a) Section. (b) Before cracking: elastic behavior. (c) After cracking: at first yield. (d) After cracking: at ultimate. (e) Moment-curvature curve.

Contoh soal

The modular ratio $n = E_s/E_c = 29/3.2 = 9.06$.

$$\begin{aligned} A &= bh + (n - 1)(A_s + A'_s) \\ &= (10 \times 25) + (8.06 \times 3.16) + (8.06 \times 1.58) \\ &= 250 + 25.5 + 12.7 = 288.2 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

Centroid of the transformed section is given by taking moments of the areas about the top edge of the section.

$$\bar{y} = \frac{(250 \times 12.5) + (25.5 \times 23) + (12.7 \times 2)}{288.2} = 12.97 \text{ in}$$

Hence the moment of inertia is given by

$$\begin{aligned} I &= \left(\frac{1}{12} \times 10 \times 25^3\right) + (250 \times 0.47^2) + (25.5 \times 10.03^2) \\ &\quad + (12.7 \times 10.97^2) = 17,170 \text{ in}^4 \end{aligned}$$

Cracking will occur when the modulus of rupture $f_r = 410$ psi is reached in the bottom fiber.

$$\begin{aligned} \therefore M_{\text{crack}} &= \frac{f_r I}{y_{\text{bottom}}} = 410 \times \frac{17,170}{12.03} \\ &= 585,200 \text{ lb} \cdot \text{in} \text{ (66.1 kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \phi_{\text{crack}} &= \frac{f_r/E_c}{y_{\text{bottom}}} = \frac{410/(3.2 \times 10^6)}{12.03} \\ &= 1.07 \times 10^{-5} \text{ rad/in (} 0.419 \times 10^{-3} \text{ rad/m)} \end{aligned}$$

2. After cracking, at first yield (see Fig. 6.11c)

Assuming the concrete is behaving elastically, from Eq. 6.11 we write

$$\begin{aligned} k &= \left[(0.01374 + 0.00687)^2 9.06^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(0.01374 + \frac{0.00687 \times 2}{23} \right) 9.06 \right]^{1/2} \\ &\quad - (0.01374 + 0.00687) 9.06 \\ &= 0.356 \end{aligned}$$

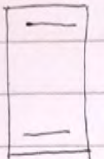
$$\therefore kd = 0.356 \times 23 = 8.19 \text{ in}$$

$$\text{Now } \epsilon_s = 40,000/(29 \times 10^6) = 0.00138.$$



Keterangan perhitungan:

p. 19. $b = 10 \text{ in}$ $A_s = 4 \text{ No. 8} = 3.16 \text{ in}^2$
 $h = 25 \text{ in}$ $A_s' = 2 \text{ No. 8} = 1.58 \text{ in}^2$



$f_c' = 3000 \text{ psi}$
 $f_r = \frac{2.83}{2.83} 410 \text{ psi}$
 $E_c = 3.2 \times 10^6 \text{ psi}$
 $E_s = 29 \times 10^6 \text{ psi}$
 $f_y = 40,000 \text{ psi}$
 $E_{cu} = 0,004$

$n = E_s / E_c$
 $= 9,0625$

$A = bh + (n-1)(A_s + A_s')$ $n-1 = 8,06$
 $= (10 \times 25) + (8,06 \times 3,16) + (8,06 \times 1,58)$
 $= \frac{250}{250} + \frac{25,5}{25,5} + \frac{12,7}{12,7}$
 $= 288,2 \text{ in}^2$

$\bar{y} =$
 $= \frac{b \times h \times \frac{h}{2} + (n-1)A_s \times (h-d) + (n-1)A_s' \times d}{A}$
 $= \frac{250 \times 12,5 + (25,5 \times 23) + (12,7 \times 2)}{288,2} = 12,97 \text{ in}$

$I = \frac{1}{2} b h^3 + b x n + (n-1)A_s$
 $= (\frac{1}{2} \times 10 \times 25^3) + (250 \times 0,47^2) + (25,5 \times 10,03^2)$
 $+ (12,7 \times 10,97^2) = 17,170 \text{ in}^4$

$y_{\text{bottom}} = 12,03 \text{ in} = h - \bar{y} = 25 - 12,97 = 12,03$

$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I}{y_{\text{bottom}}} = \frac{410 \times 17,170}{12,03} = 585,200 \text{ lb.in}$

$\frac{0,47 \text{ k}}{10,03} + \frac{10,97}{21,00} = \frac{1}{2}(h-d-d')$
 $\frac{10,03}{10,50} + \frac{10,97}{21,00} = \frac{1}{2}(25-2-1)$
 $\frac{12,03}{10,97} + \frac{10,97}{21,00} = \frac{1}{2}(25-2)$
 $23,00 = h-d' = 25-2$

Contoh soal

From the strain diagram we find,

$$\varepsilon_c = 0.00138 \frac{8.19}{23 - 8.19} = 0.000763$$

$$\therefore f_c = 0.000763 \times 3.2 \times 10^6 = 2440 \text{ psi} = 0.81f'_c$$

Therefore, the triangular stress block is an approximation.

From the strain diagram we find

$$\varepsilon'_s = 0.000763 \frac{8.19 - 2}{8.19} = 0.000577$$

$$\therefore f'_s = 0.000577 \times 29 \times 10^6 = 16,730 \text{ psi}$$

$$\therefore C_c = \frac{1}{2} f_c b k d = \frac{1}{2} \times 2440 \times 10 \times 8.19 = 99,920 \text{ lb}$$

$$C_s = A'_s f'_s = 1.58 \times 16,730 = 26,430 \text{ lb}$$

Therefore, total compressive force is 126,350 lb acting at \bar{y} from the top edge, where

$$\bar{y} = \frac{(2 \times 26,430) + (99,920 \times 8.19/3)}{126,350} = 2.58 \text{ in}$$

$$\therefore jd = d - \bar{y} = 23 - 2.58 = 20.42 \text{ in}$$

From Eq. 6.12

$$\begin{aligned} M_y &= 3.16 \times 40,000 \times 20.42 \\ &= 2.58 \times 10^6 \text{ lb} \cdot \text{in} \text{ (291 kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

and from Eq. 6.13

$$\begin{aligned} \phi_y &= \frac{0.00138}{23 - 8.19} \\ &= 9.32 \times 10^{-5} \text{ rad/in (} 3.67 \times 10^{-3} \text{ rad/m)} \end{aligned}$$

3. *After cracking, at ultimate load (see Fig. 6.11d)*

Assume that the compression steel is also yielding; from Eq. 6.14 we have

$$a = \frac{40,000(3.16 - 1.58)}{0.85 \times 3000 \times 10} = 2.48 \text{ in}$$

$$\therefore c = 2.48/0.85 = 2.92 \text{ in}$$

From the strain diagram, we find

$$\varepsilon'_s = 0.004 \frac{2.92 - 2}{2.92} = 0.00126$$

Contoh soal

But $f_y/E_s = 0.00138$; therefore, compression steel is not yielding. Actual stress in compression steel can be found from Eq. 4.34. Alternatively, use a trial-and-error approach. Try $f'_s = 38,800$ psi, then

$$a = \frac{(40,000 \times 3.16) - (38,800 \times 1.58)}{0.85 \times 3000 \times 10} = 2.55 \text{ in}$$

$$\therefore c = 2.55/0.85 = 3.00 \text{ in}$$

$$\therefore \epsilon'_s = 0.004 \times \frac{3 - 2}{3} = 0.00133$$

$$\therefore f'_s = 0.00133 \times 29 \times 10^6 = 38,600 \text{ psi}$$

which checks satisfactorily with the trial value.

$$\begin{aligned} \therefore M_u &= 0.85f'_c ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \\ &= 0.85 \times 3000 \times 2.55 \times 10 \left(23 - \frac{2.55}{2} \right) \\ &\quad + 1.58 \times 38,600 (23 - 2) \\ &= 2.69 \times 10^6 \text{ lb} \cdot \text{in} \text{ (304 kN} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

And from Eq. 6.16 we write

$$\begin{aligned} \phi_u &= \frac{0.004}{3} \\ &= 133.3 \times 10^{-5} \text{ rad/in} \text{ (} 52.5 \times 10^{-3} \text{ rad/m)} \end{aligned}$$

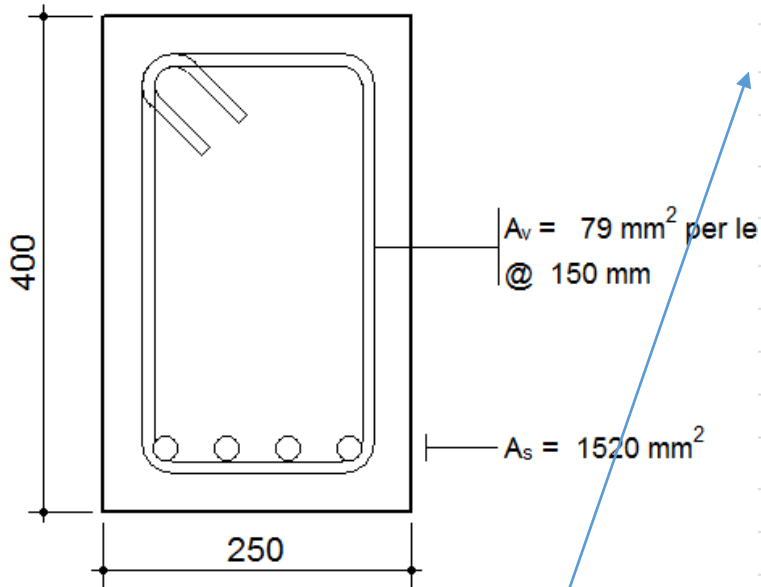
The moment-curvature diagram appears in Fig. 6.11e.

ILMU ALAT PENGABDIAN



Momen-kelengkungan pada balok bertulangan tunggal

Contoh soal



Tabel 22.2.2.4.3 – Nilai β_1 untuk distribusi tegangan beton persegi ekuivalen

f_c' , MPa	β_1	
$17 \leq f_c' \leq 28$	0,85	a)
$28 < f_c' < 55$	$0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7}$	b)
$f_c' \geq 55$	0,65	c)

Sumber: SNI 2847:2019

f_c'	=	28	MPa	=	4057.97	psi	(1 psi = 0,0069 MPa)
$0,2 f_c'$	=	5.60	MPa				
β_1	=	0.85					
D longitudinal	=	22					
A_s 1 tul	=	380.13271	mm ²				
A_s	=	4	D	22	1520.53	mm ²	
E_s	=	200,000	MPa				
b	=	250	mm				
h	=	400	mm				
cover	=	30	mm				
ϕ sengkang	=	10	mm				
A_{sv}	=	78.54	mm ²				
d	=	349	mm				
c	=	0.3	h	=	120	mm	(asumsi awal iterasi ke-1)
ϵ_{50u}	=	3.635E-03					
ρ_s	=	8.592E-03					
b''	=	190	mm				
h''	=	340					
S_h	=	150	mm				
ϵ_{50h}	=	7.155E-03					
Z	=	56.88					

Contoh soal

Dari Fig. 2.18. (Park dan Paulay, 1975)

Cara manual

Daerah AB:
 $\epsilon_c \leq 0,002$
 (terkekang dan tidak terkekang)

Daerah BC:
 $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$
 (terkekang dan tidak terkekang)

Daerah CD:
 $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$
 (terkekang)

No.	Windows User: asumsi awal direvisi dengan goal seek			Windows User: ecu jika unconfined			Hp: sudah > fy = 400 MPa			Windows User: kontrol goal seek		
	c asumsi awa (mm)	ϵ_c	f_c (MPa)	f_c (MPa)	$a = \beta_1 c$ (mm)	$C_c = 0,85 f_c a b$ (N)	$T_c = C_c$ (N)	$f_s = T_c / A_s$ (MPa)	$\epsilon_s = f_s / E_s$	$c = (\epsilon_s / \epsilon_c) (d - c)$ (mm)	c asumsi-c hitung=0 (mm)	jd = d-a/2 (mm)
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000	0	0	349.00
2	124.27	0.0005	12.25	12.25	105.63	274969.25	274969.25	180.84	0.00090	124.27	0	296.18
3	131.92	0.0010	21.00	21.00	112.13	500400.87	500400.87	329.10	0.00165	131.92	0	292.93
4	141.34	0.0015	26.25	26.25	120.14	670168.86	670168.86	440.75	0.00220	141.34	0	288.93
5	153.38	0.0020	28.00	28.00	130.37	775716.29	775716.29	510.16	0.00255	153.38	0	283.81
6	167.55	0.0025	27.20	26.60	142.42	823304.30	823304.30	541.46	0.00271	167.55	0	277.79
7	179.86	0.0030	26.41	25.20	152.88	857915.14	857915.14	564.22	0.00282	179.86	0	272.56
8	190.79	0.0035	25.61	23.80	162.17	882600.95	882600.95	580.46	0.00290	190.79	0	267.91
9	200.65	0.0040	24.81	22.40	170.55	899350.08	899350.08	591.47	0.00296	200.65	0	263.72
10	209.65	0.0045	24.02	21.00	178.21	909549.90	909549.90	598.18	0.00299	209.65	0	259.90
11	217.96	0.0050	23.22	19.60	185.26	914212.63	914212.63	601.25	0.00301	217.96	0	256.37
12	225.67	0.0055	22.43	18.20	191.82	914102.99	914102.99	601.17	0.00301	225.67	0	253.09
13	232.88	0.0060	21.63	16.80	197.95	909818.72	909818.72	598.36	0.00299	232.88	0	250.03
14	239.66	0.0065	20.83	15.40	203.71	901834.73	901834.73	593.11	0.00297	239.66	0	247.14
15	246.06	0.0070	20.04	14.00	209.15	890537.99	890537.99	585.68	0.00293	246.06	0	244.42
16	252.13	0.0075	19.24	12.60	214.31	876246.60	876246.60	576.28	0.00288	252.13	0	241.84
17	257.91	0.0080	18.44	11.20	219.22	859228.39	859228.39	565.08	0.00283	257.91	0	239.39
18	263.43	0.0085	17.65	9.80	223.91	839709.72	839709.72	552.25	0.00276	263.43	0	237.04
19	268.70	0.0090	16.85	8.40	228.40	817884.08	817884.08	537.89	0.00269	268.70	0	234.80
20	273.77	0.0095	16.06	7.00	232.70	793919.49	793919.49	522.13	0.00261	273.77	0	232.65
21	278.64	0.0100	15.26	5.60	236.84	767961.79	767961.79	505.06	0.00253	278.64	0	230.58
22	283.33	0.0105	14.46		240.83	740139.11	740139.11	486.76	0.00243	283.33	0	228.59
23	287.86	0.0110	13.67		244.68	710564.65	710564.65	467.31	0.00234	287.86	0	226.66
24	292.23	0.0115	12.87		248.40	679338.84	679338.84	446.78	0.00223	292.23	0	224.80
25	296.47	0.0120	12.07		252.00	646551.61	646551.61	425.21	0.00213	296.47	0	223.00
26	300.58	0.0125	11.28		255.50	612283.54	612283.54	402.68	0.00201	300.58	0	221.25
27	304.58	0.0130	10.48		258.89	576607.26	576607.26	379.21	0.00190	304.58	0	219.55
28	308.46	0.0135	9.68		262.19	539588.55	539588.55	354.87	0.00177	308.46	0	217.91
29	312.24	0.0140	8.89		265.40	501287.11	501287.11	329.68	0.00165	312.24	0	216.30
30	315.92	0.0145	8.09		268.53	461757.37	461757.37	303.68	0.00152	315.92	0	214.73
31	319.51	0.0150	7.30		271.58	421049.33	421049.33	276.91	0.00138	319.51	0	213.21
32	323.01	0.0155	6.50		274.56	379208.32	379208.32	249.39	0.00125	323.01	0	211.72
33	326.44	0.0160	5.70		277.47	336276.43	336276.43	221.16	0.00111	326.44	0	210.26
34	327.39	0.0165	5.60		278.28	331157.97	331157.97	217.79	0.00109	327.39	0	209.86
35	327.96	0.0170	5.60		278.76	331727.76	331727.76	218.17	0.00109	327.96	0	209.62
36	330.80	0.0200	5.60		281.18	334605.33	334605.33	220.06	0.00110	330.80	0	208.41

Contoh soal

Dari Fig. 2.18. (Park dan Paulay, 1975)

Cara manual

Daerah AB:
 $\epsilon_c \leq 0,002$
 (terkekang dan tidak terkekang)

Daerah BC:
 $0,002 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$
 (terkekang dan tidak terkekang)

Daerah CD:
 $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$
 (terkekang)

	Confined	Confined	Confined	Confined	Confined	Confined
	Momen nominal	Kelengkungan	Kelengkungan	Kelengkungan	Kelengkungan	Kelengkungan
No.	$M_n = C_c \cdot j d$ (kN.m)	ϵ_s/c (tan)	$\epsilon_s/(d-c)$ (tan)	arcus tan (degree)	(rad)	(rad/km)
1	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
2	81.44	4.02E-06	4.02E-06	2.31E-04	4.02E-06	4.02
3	146.58	7.58E-06	7.58E-06	4.34E-04	7.58E-06	7.58
4	193.63	1.06E-05	1.06E-05	6.08E-04	1.06E-05	10.61
5	220.16	1.30E-05	1.30E-05	7.47E-04	1.30E-05	13.04
6	228.71	1.49E-05	1.49E-05	8.55E-04	1.49E-05	14.92
7	233.83	1.67E-05	1.67E-05	9.56E-04	1.67E-05	16.68
8	236.46	1.83E-05	1.83E-05	1.05E-03	1.83E-05	18.34
9	237.18	1.99E-05	1.99E-05	1.14E-03	1.99E-05	19.94
10	236.39	2.15E-05	2.15E-05	1.23E-03	2.15E-05	21.46
11	234.38	2.29E-05	2.29E-05	1.31E-03	2.29E-05	22.94
12	231.35	2.44E-05	2.44E-05	1.40E-03	2.44E-05	24.37
13	227.48	2.58E-05	2.58E-05	1.48E-03	2.58E-05	25.76
14	222.88	2.71E-05	2.71E-05	1.55E-03	2.71E-05	27.12
15	217.67	2.84E-05	2.84E-05	1.63E-03	2.84E-05	28.45
16	211.91	2.97E-05	2.97E-05	1.70E-03	2.97E-05	29.75
17	205.69	3.10E-05	3.10E-05	1.78E-03	3.10E-05	31.02
18	199.05	3.23E-05	3.23E-05	1.85E-03	3.23E-05	32.27
19	192.04	3.35E-05	3.35E-05	1.92E-03	3.35E-05	33.49
20	184.70	3.47E-05	3.47E-05	1.99E-03	3.47E-05	34.70
21	177.08	3.59E-05	3.59E-05	2.06E-03	3.59E-05	35.89
22	169.19	3.71E-05	3.71E-05	2.12E-03	3.71E-05	37.06
23	161.06	3.82E-05	3.82E-05	2.19E-03	3.82E-05	38.21
24	152.72	3.94E-05	3.94E-05	2.25E-03	3.94E-05	39.35
25	144.18	4.05E-05	4.05E-05	2.32E-03	4.05E-05	40.48
26	135.47	4.16E-05	4.16E-05	2.38E-03	4.16E-05	41.59
27	126.60	4.27E-05	4.27E-05	2.45E-03	4.27E-05	42.68
28	117.58	4.38E-05	4.38E-05	2.51E-03	4.38E-05	43.77
29	108.43	4.48E-05	4.48E-05	2.57E-03	4.48E-05	44.84
30	99.16	4.59E-05	4.59E-05	2.63E-03	4.59E-05	45.90
31	89.77	4.69E-05	4.69E-05	2.69E-03	4.69E-05	46.95
32	80.29	4.80E-05	4.80E-05	2.75E-03	4.80E-05	47.99
33	70.71	4.90E-05	4.90E-05	2.81E-03	4.90E-05	49.01
15	69.50	5.04E-05	5.04E-05	2.89E-03	5.04E-05	50.40
16	69.54	5.18E-05	5.18E-05	2.97E-03	5.18E-05	51.84
17	69.73	6.05E-05	6.05E-05	3.46E-03	6.05E-05	60.46

Plane Angle

1 = 57.2958

Radian = Degree

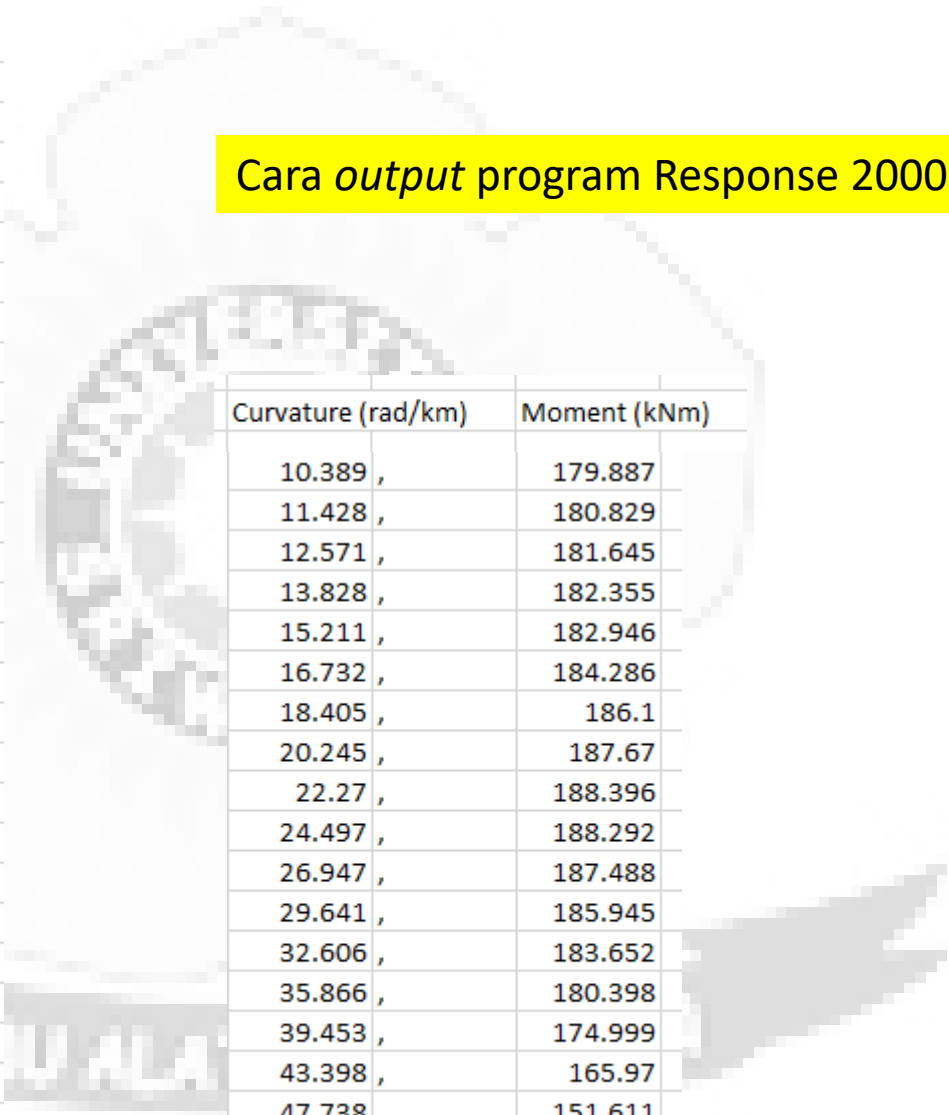
Formula $1 \text{ rad} \times 180/\pi = 57.296^\circ$

Contoh soal

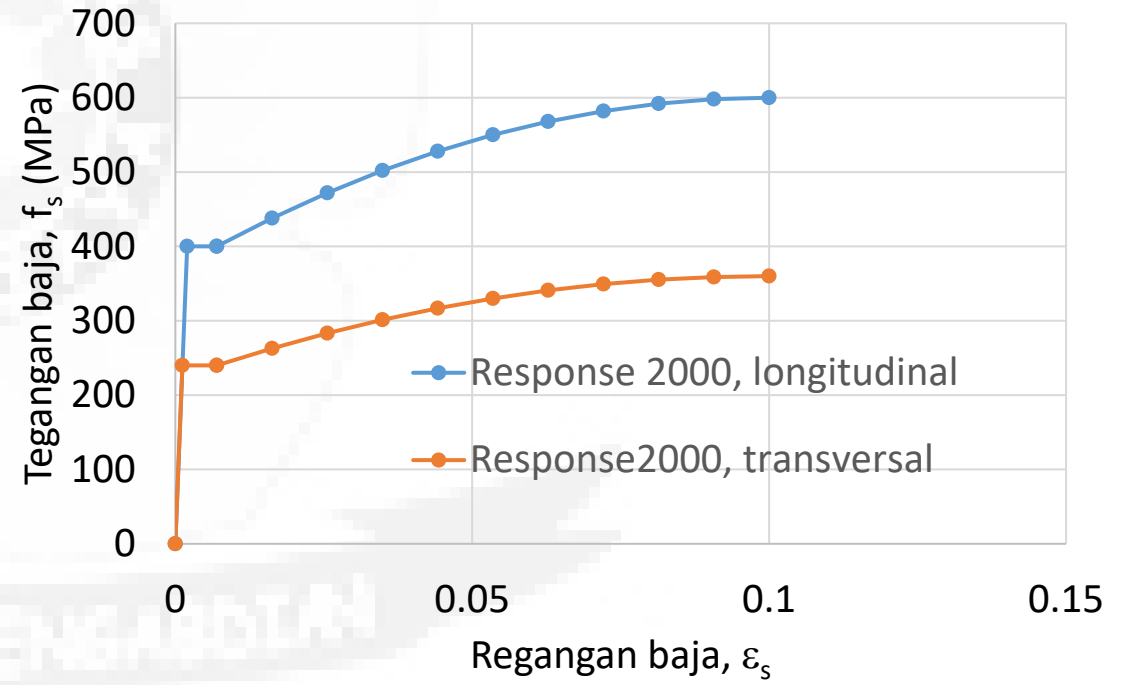
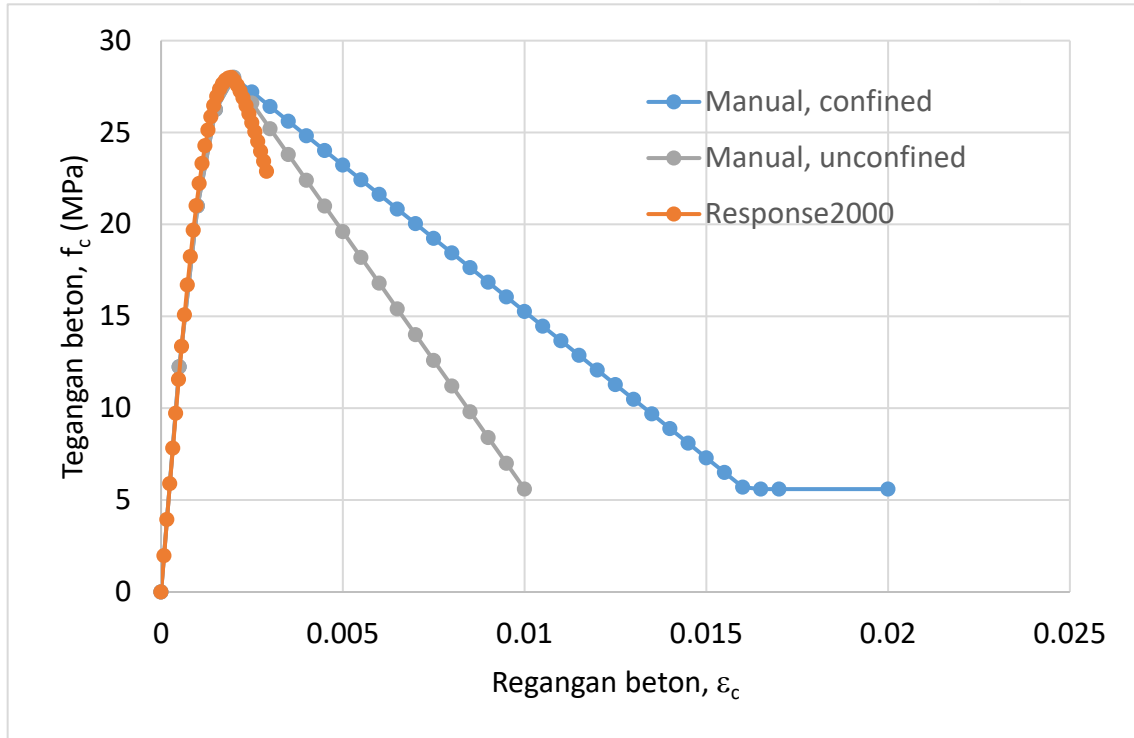
Data from Graph	
=====	
Title	: Control: M-phi
X Axis	Title : Curature (rad/km)
Y Axis	Title : Momen(kNm)
Curvature (rad/km)	Moment (kNm)
0 ,	0
0.331 ,	12.576
0.831 ,	25.519
1.331 ,	35.249
1.831 ,	44.526
2.331 ,	53.687
2.831 ,	62.804
3.331 ,	71.878
3.831 ,	80.913
4.331 ,	89.896
4.831 ,	98.814
5.331 ,	107.653
5.864 ,	116.98
6.451 ,	127.112
7.096 ,	138.045
7.806 ,	149.799
8.586 ,	162.342
9.445 ,	175.045

Cara *output* program Response 2000

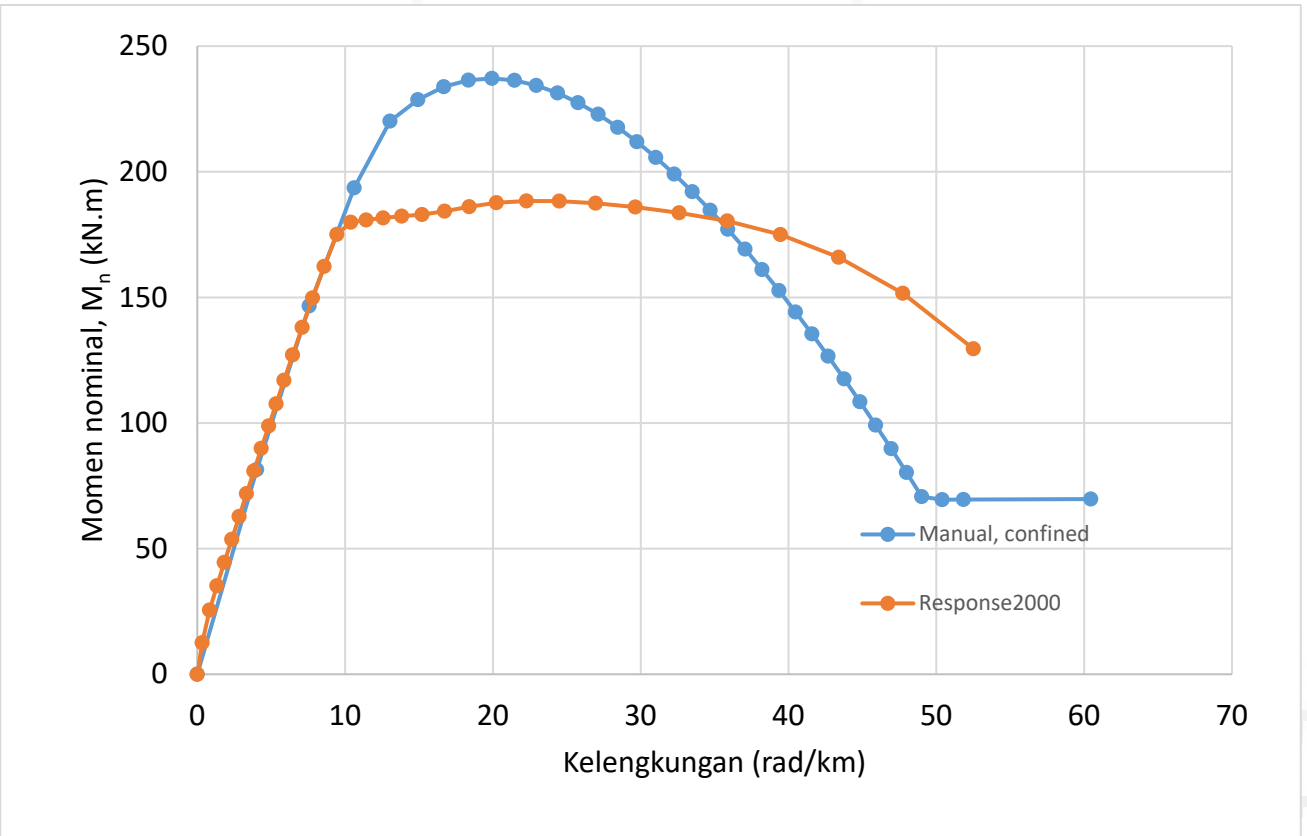
Curvature (rad/km)	Moment (kNm)
10.389 ,	179.887
11.428 ,	180.829
12.571 ,	181.645
13.828 ,	182.355
15.211 ,	182.946
16.732 ,	184.286
18.405 ,	186.1
20.245 ,	187.67
22.27 ,	188.396
24.497 ,	188.292
26.947 ,	187.488
29.641 ,	185.945
32.606 ,	183.652
35.866 ,	180.398
39.453 ,	174.999
43.398 ,	165.97
47.738 ,	151.611
52.512 ,	129.553



Contoh soal



Contoh soal



ILMU ALAT PENGABDIAN



Referensi

- ACI Committee 318, (2014): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 318, (2019): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2019): *SNI 2847:2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Imran, I., dan Budiono, B. (2014): Materi kuliah program pascasarjana mata kuliah Perilaku Struktur Beton, Institut Teknologi Bandung.
- Imran, I. dan Zulkifli, E., (2014): *Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Imran, I. dan Hendrik, F., (2014): *Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang*, Penerbit ITB, Bandung.
- Nawy, E. G., (2009): *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*, 6th edition, Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Park, R. dan Paulay, T., (1975): *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.
- Paulay, T. dan Priestly, M.J.N, (1992): *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Willey & Sons.
- Wight, J. K., (2016): *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 7th ed., Pearson Education, Inc., New Jersey.

Referensi pada SNI 2847:2019

R9.9.1.2 Standar ini tidak berisi syarat mendetail untuk mendesain balok tinggi untuk momen, kecuali jika distribusi regangan nonlinier harus dipertimbangkan. Pedoman untuk desain balok tinggi untuk lentur ada pada **Chow et al. (1953)**, **Portland Cement Association (1946)** dan **Park and Paulay (1975)**.

R25.7.3.3 Pengaruh tulangan spiral dalam meningkatkan kekuatan inti beton tidak terlihat sampai kolom menerima beban dan deformasi yang cukup untuk membuat kulit beton pecah. Jumlah tulangan spiral yang dibutuhkan oleh Pers. (25.7.3.3) ditujukan untuk memberikan kekuatan tambahan untuk kolom yang menerima beban konsentris yang sama dengan atau sedikit lebih besar dari kekuatan yang hilang ketika kulit beton pecah. Penurunan Pers. (25.7.3.3) diberikan oleh **Richart (1933)**. Hasil uji menunjukkan bahwa kolom yang dipasang tulangan spiral mempunyai daktilitas dan ketegaran yang cukup baik. Riset (**Richard et al. 1929**; **Richart 1933**; **Pessiki et al 2001**; **Saatcioglu and Razvi 2002**) mengindikasikan bahwa kekuatan leleh tulangan yang dapat digunakan sebagai pengekan mencapai 700 MPa.