

ANALISA HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN PADA KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI

Ari Wibowo

Dosen / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono No. 167 Malang, 65145, Jawa Timur
Korespondensi : ariwibowo@ub.ac.id

ABSTRAK

Perilaku beton terkekang dipengaruhi oleh beberapa parameter. Parameter-parameter tersebut antara lain : a) rasio volume tulangan transversal, b) spasi, c) kekuatan leleh, d) susunan tulangan transversal, e) kuat tekan beton, f) dimensi penampang, g) kandungan dan susunan tulangan longitudinal, h) cover beton. Dalam studi kali ini dibahas tentang perbandingan analisa hubungan tegangan-regangan dengan mengacu ke parameter-parameter diatas, dan diperbandingkan dengan hasil eksperimental untuk melihat yang paling mendekati eksak.

Kata kunci: hubungan tegangan-regangan, beton bertulang

1. PENDAHULUAN

Kolom beton mutu tinggi sudah mulai banyak dipergunakan dalam konstruksi dewasa ini khususnya untuk struktur tinggi. Hal ini karena untuk beban yang diberikan, kolom beton mutu tinggi dapat mempunyai penampang yang lebih kecil sehingga dapat memperluas ruang lantai; selain itu dapat lebih mengatur deformasi. Dalam perencanaannya tentu saja harus berdasarkan pada karakteristik beton polos mutu tinggi dan beton tak terkekang serta beton terkekang mutu tinggi.

Dewasa ini, karakteristik beton terkekang sudah banyak diteliti khususnya untuk beton normal. Model kekangan yang dikembangkan untuk beton kekuatan normal belum tentu cocok untuk beton mutu tinggi. Pada kenyataannya, model-model ini menunjukkan prediksi/estimasi daktilitas yang terlampaui tinggi ketika diaplikasikan ke beton mutu tinggi (Yong et.al. 1988; Razvi 1995). Saat ini kebanyakan model untuk beton mutu tinggi adalah versi modifikasi dari model pada beton normal. Modifikasi biasanya

didasarkan pada data tes yang terbatas, dengan asumsi dan filosofi masing-masing. Untuk itu, dalam studi ini diperbandingkan beberapa model hubungan tegangan-regangan pada beton mutu tinggi. Sebagai acuan dilihat beberapa hasil eksperimental terhadap perilaku beton mutu tinggi yang mencakup dasar acuan model tersebut, dan diperbandingkan terhadap hasil eksperimental yang ada.

Dalam paper ini di bahas analisa hubungan tegangan-regangan kolom persegi beton mutu tinggi dibawah beban aksial secara monotonik.

2. PERILAKU KEGAGALAN ELEMEN

Cusson (1994) dan Yong (1988) meneliti tentang hubungan tegangan-regangan dari kolom beton terkekang mutu tinggi yang secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut (Gambar 1 dan 2):

▪ Kurva naik

Bagian ini dimulai dari saat beban aksial pada beton P_c diberikan sampai beban aksial maksimum pertama P_{C1} ; dimana terlihat bahwa selama bagian menaik ini, kekangan mempunyai efek

yang kecil. Puncak ini berkaitan dengan beban P_{C1} ketika cover beton secara mendadak terpisah. P_c adalah beban aksial pada beton yang di dapat dari:

Beban aksial maksimum pertama P_{C1} adalah beban dimana cover beton mulai terkelupas. Tegangan yang terjadi pada bagian ini adalah P_c dibagi dengan luas beton penuh A_c . Luas A_c di dapat dengan mengurangkan luas penampang kolom dengan luas total tulangan longitudinal yang memotong penampang. Bagian ini dapat dilihat dalam gambar 3 dan bagian garis tebal OA dalam gambar 4. Bagian OA adalah bagian yang berimpit dengan bagian menaik dari normalisasi beban aksial terhadap P_{oc} pada kolom 1D, dimana P_{oc} adalah kuat tekan tak terkekang terhadap luas total penuh ($P_c = 0.85 f'_c A_c$).

- Kurva transisi kontinyu

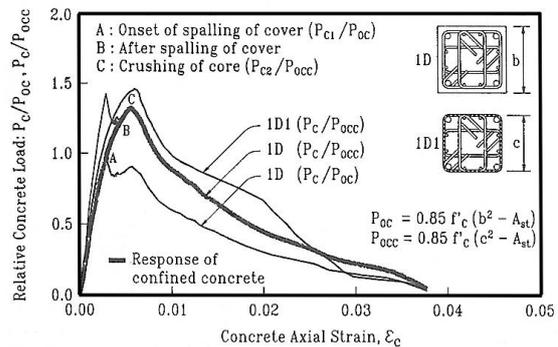
Sejalan dengan makin menghilangnya cover beton, inti beton makin mendapat kekuatannya sampai mencapai puncak kedua P_{C2} . Puncak kedua ini terjadi saat satu atau dua sengkang terbuka dan kolom mengalami permulaan kehancuran bidang. Transisi antara titik A dan B pada respon kolom terkekang diestimasi sebagai kurva halus.

- Kurva menurun

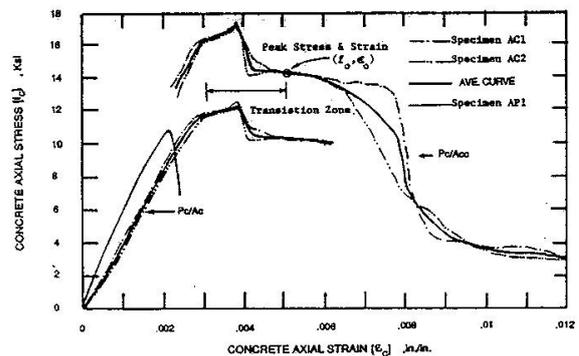
Bagian ini dimulai sejak tercapainya beban aksial maksimum kedua P_{C2} , dimana di dapatkan dari pembagian beban aksial beton P_c dengan luas beton terkekang yang dibatasi oleh garis pusat perimeter terluar sengkang ($= P_c / A_{cc}$). Hal ini ditunjukkan dalam bagian kanan gambar 3, dan bagian garis tebal dari titik B yang berimpit dengan kurva 1D (P_c/P_{occ}), dimana P_{occ} adalah kuat tekan aksial tak terkekang terhadap luas inti beton ($P_{occ} = 0.85 f'_c A_{cc}$). Harga P_{C2} pada puncak kedua, dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari harga P_{C1} pada puncak pertama, tergantung dari efisiensi

kekangan. Bila efisiensi kekangan sangat baik, maka harga P_{C2} (dengan penampang beton tereduksi), mempunyai harga yang lebih tinggi daripada P_{C1} (dengan penampang beton penuh). Demikian juga sebaliknya.

Setelah puncak kedua, terjadi penurunan kapasitas beban aksial yang sangat cepat sampai mencapai kegagalan akibat formasi penuh kehancuran bidang, yang memotong inti beton yang terkekang menjadi dua bagian, dibarengi dengan melelehnya semua sengkang, beberapa sengkang putus, dan tulangan longitudinal mengalami tekuk.



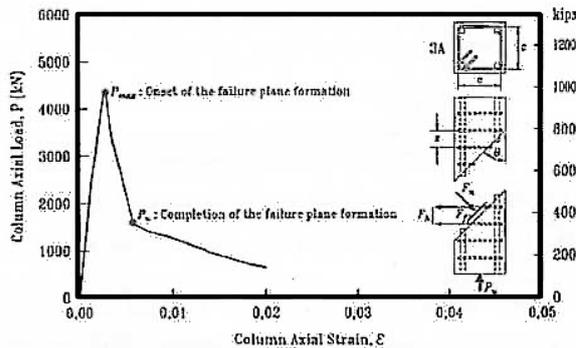
Gambar 1. Kurva normalisasi beban aksial-regangan (Cusson 1994)



Gambar 2. Kurva tegangan-regangan kolom A (Yong et. al. 1988)

Diukur dari sumbu vertikal, sudut antara bidang kehancuran geser dan sumbu vertikal adalah sebesar 25° untuk terkekang ringan sampai dengan 45° untuk terkekang berat (Cusson 1995). Sedangkan Yook et.al. (1988) mengukur sudut tersebut sebesar $55-68^\circ$

antara bidang kehancuran geser terhadap bidang horisontal seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi tentang pembentukan bidang kehancuran geser

3. KARAKTERISTIK BETON MUTU TINGGI

Berdasar hasil eksperimental oleh Cusson (1994) dan Yong (1988), diketahui bahwa karakteristik beton mutu tinggi dipengaruhi oleh beberapa parameter:

a. Kuat tekan beton

Beton mutu tinggi mempunyai ekspansi lateral yang lebih kecil di bawah beban tekan aksial daripada beton normal sejalan dengan modulus elastisitas yang lebih tinggi dan retak micro internal yang lebih kecil. Konsekuensinya, tulangan pengekuat baru berperan dibagian yang lebih lanjut dari proses, dan efisiensi dari kekangan pasif dari beton mutu tinggi akan tereduksi. Kenaikan daktilitas lebih besar terjadi pada beton dengan mutu yang lebih rendah dibandingkan pada beton mutu tinggi.

b. Kuat Leleh Pengaku Tansversal

Kuat leleh dari tulangan pengekuat menentukan batas atas dari tekanan kekangan pada inti beton. Semakin tinggi tekanan pengekuat pada inti beton, semakin tinggi efisiensi kekangan. Bila pada saat kekuatan inti beton mencapai puncak, sedangkan tegangan pada tulangan lateral belum mencapai leleh, maka tidak

terjadi penambahan kekuatan tekan beton dan daktilitas.

c. Konfigurasi Tie

Konfigurasi tie menentukan efektifitas luas beton terkekang dimana meningkatkan distribusi tulangan longitudinal sekeliling inti beton. Semakin besar efektifitas luas beton terkekang, semakin besar efektifitas kekangan.

d. Kandungan Tulangan Transversal

Tekanan kekangan lateral pada inti beton mempunyai hubungan langsung dengan kandungan tulangan transversal. Semakin besar tekanan kekangan pada inti beton menghasilkan efektifitas kekangan yang semakin baik.

e. Spasi sengkang

Semakin kecil spasi sengkang, semakin besar luas beton yang terkekang, yang menghasilkan efektifitas kekangan yang makin tinggi. Spasi sengkang mengontrol tekuk pada tulangan longitudinal.

f. Kandungan Tulangan Longitudinal

Semakin besar kandungan tulangan longitudinal (yang di dapat dari diameter tulangan yang makin besar) akan mencegah tekuk tulangan longitudinal yang dini. Sedangkan percobaan Yong et. al. (1988) menunjukkan bahwa, perbedaan jumlah tulangan longitudinal tidak berpengaruh pada besar tegangan maksimal yang dimiliki, namun terjadi penurunan yang cukup besar terhadap daktilitas grup L.

g. Efek selimut beton

Kurva penampang tanpa cover mirip dengan beton polos sampai sekitar $0.9 f_c/f_c'$, yang menunjukkan bahwa tulangan tidak bekerja sampai tegangan beton hampir mencapai tegangan ultimat dari beton polos. Kurva antara beton dengan cover mirip dengan kurva pada beton tanpa cover, kecuali bahwa modulus tangensial di

bagian menaik adalah lebih kecil. Hal ini disebabkan karena perbedaan perumusan tegangan antara keduanya. Cover beton kelihatannya tidak berpengaruh pada tegangan puncak f_o dan ϵ_o dan daktilitas dari beton terkekang.

Mengacu pada perumusan Richart et. Al. (1928), di dapat bahwa tekanan lateral dapat meningkatkan kuat maksimum pada kolom beton normal terkekang. Kuat maksimum dari beton terkekang f_{cc} :

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4.1f_l \quad (1)$$

Bentuk di atas menjadi pola dasar perumusan selanjutnya. Inti permasalahan dalam perumusan hubungan tegangan-regangan pada kolom beton persegi mutu tinggi adalah:

- Penentuan tegangan kekangan efektif. Tekanan lateral nominal (rata-rata) f_l dapat diterapkan hanya untuk kasus terkekang secara uniform, sedangkan untuk kasus dimana kekangan tidak uniform maka tekanan lateral nominal tersebut perlu direduksi.
- Penentuan besar kuat tekan pada kolom beton polos f'_{co} sebagai rasio terhadap kuat tekan f'_c beton silinder 15x30 cm.
- Penentuan besar tegangan baja pada tulangan transversal saat inti beton (beton terkekang) mengalami tegangan puncak f'_{cc} . Pada hubungan tegangan-regangan kolom beton mutu normal, besar f_l diambil dengan asumsi bahwa tulangan transversal sudah leleh saat beton terkekang mengalami tegangan puncak. Namun ini belum tentu terjadi pada kolom beton mutu tinggi.
- Diketahui dari hasil eksperimental diatas, bahwa efektifitas kekangan pada kolom beton mutu tinggi lebih rendah dari pada kolom beton mutu normal.

Untuk itu perlu diteliti berapa besar tingkat efektifitas kekangan yang dimiliki kolom tersebut.

4. TEKAMAN KEKANGAN EFEKTIF

4.1 Model Cusson (1995)

Untuk kolom persegi terkekang, tekanan lateral pada kolom persegi terkekang di dapat:

$$f_l = \frac{f_{hcc}}{s} \left(\frac{A_{shx} + A_{shy}}{c_x + c_y} \right) \quad (2)$$

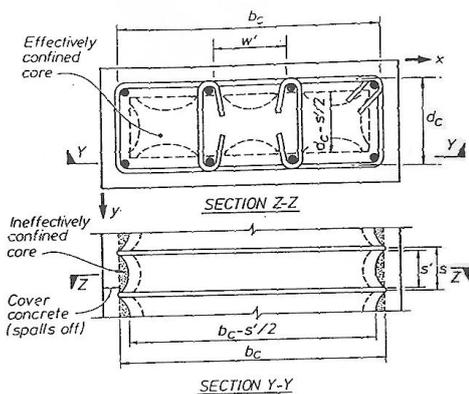
dimana: f_{hcc} = tegangan pada tulangan transversal pada kuat tekan maksimum inti beton; s = spasi sengkang dari pusat ke pusat; A_{shx} dan A_{shy} = luas total tulangan lateral yang tegak lurus terhadap arah sumbu x dan sumbu y.

Cusson menggunakan metode yang diusulkan oleh Mander et al. (1988) seperti terlihat pada Gambar 4-5 yang berdasar pada rasio volume daerah terkekang terhadap volume daerah total, sehingga koefisien efektifitas kekangan K_e :

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6c_x c_y} \right) \left(1 - \frac{s'}{2c_x} \right) \left(1 - \frac{s'}{2c_y} \right)}{(1 - \rho_c)} \quad (3)$$

dimana: $\sum w_i^2$ = jumlah kuadrat dari semua jarak bersih antara tulangan longitudinal dalam penampang persegi; s' = jarak bersih antara sengkang, ρ_c = rasio tulangan longitudinal terhadap inti beton. Dapat dilihat bahwa tulangan sengkang menjadi tidak efektif, bila $s' \geq 2c_x$ atau $s' \geq 2c_y$.

Maka tekanan kekangan efektif yang teraplikasi ke inti beton, f_{le} adalah perkalian tekanan lateral nominal f_l dengan koefisien efektifitas kekangan K_e :



Gambar 4. Ilustrasi daerah efektif kekangan oleh Mander et al. (1988)

$$f_{le} = K_e f_l = \frac{K_e f_{hcc}}{s} \left(\frac{A_{shx} + A_{shy}}{c_x + c_y} \right) \quad (4)$$

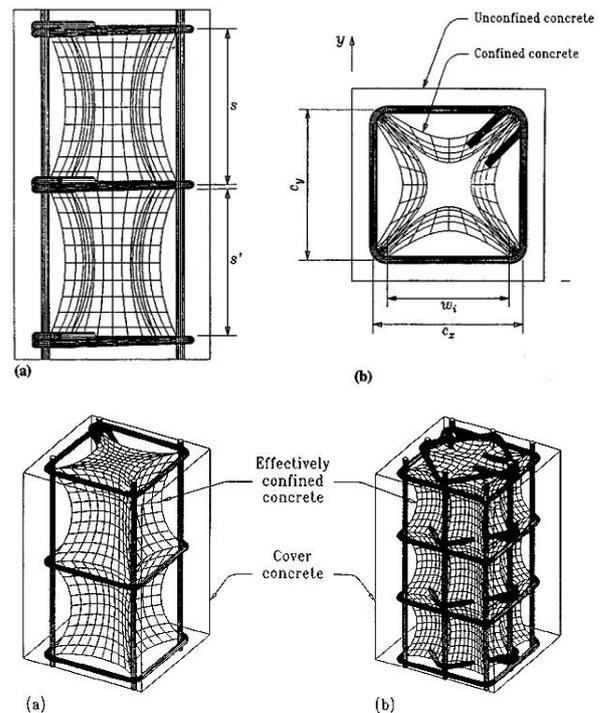
Untuk penampang bujursangkar ($c_x = c_y = c$ dan $A_{shx} = A_{shy} = A_{sh}$):

$$f_{le} = \frac{K_e f_{hcc} A_{sh}}{sc} \quad (5)$$

dimana f_{hcc} = tegangan pada tulangan transversal pada saat beton terkekang mengalami tegangan puncak; pada beton normal cukup memuaskan dengan mengambil nilai sebesar tegangan leleh, namun dalam HSC harus dipastikan apakah tulangan lateral ini sudah leleh atau belum melalui iterasi Cusson (1995).

4.2 Model Saatcioglu (1999)

Apabila Cusson (1995) mendasarkan reduksi efektifitas tekanan kekangan pada rasio volume daerah terkekang terhadap volume daerah total, maka Saatcioglu mendasarkan reduksi efektifitas tekanan kekangan berdasar *Tekanan Lateral Seragam Ekuivalen* ($f_{le} = k_2 f_l$). Dasar pemikirannya adalah: pemakaian *tekanan lateral seragam rata-rata* f_l hanya bisa diterapkan untuk kasus dimana tekanan kekangan seragam seperti pada tekanan luar hidrostatis aktif atau tekanan kekangan seragam pasif yang dikembangkan oleh spiral melingkar yang berspasi rapat.



Gambar 5. Ilustrasi daerah kekangan efektif pada kolom (Cusson, 1994)

Namun dalam kolom bujur sangkar dan persegi, kekangan oleh tulangan persegi tidak selalu seragam, dimana mengembangkan tekanan lateral tak seragam dekat dengan lokasi crosstie. Tahanan lateral di daerah ini diperoleh dari kekakuan aksial dari crosstie, dimana cukup tinggi sampai tulangan meleleh dalam tarik. Aksi penahanan berkurang secara cepat di lokasi yang semakin jauh dengan crosstie, dimana perilaku lebih banyak ditentukan oleh kekakuan lentur oleh perimeter tie.

Saatcioglu mengembangkan metode perhitungan tekanan seragam ekuivalen yang memberi efek yang sama dengan tekanan kekangan tak seragam:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{le} \quad (6)$$

$$k_1 = 6.7 (f_{le})^{-0.17} \quad (7)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (8)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q (A_s f_s \sin \alpha)}{sb_c} \quad (9)$$

dimana q = jumlah lengan tie yang melintang sisi inti beton dimana tekanan lateral rata-rata f_l akan dihitung. Tegangan pada crosstie f_s harus dihitung dalam kondisi sebenarnya melalui persamaan (18)

Tekanan lateral seragam ekivalen f_{le} seringkali lebih rendah daripada tekanan seragam rata-rata f_l sebab ketidakseragaman tekanan lateral. Reduksi ini diekspresikan melalui koefisien k_2 yang merupakan fungsi dari spasi sengkang s , dan spasi tulangan logitudinal yang tersupport secara lateral s_l .

Koefisien k_2 merefleksikan efisiensi susunan tulangan dan akan berharga satu untuk tekanan kekangan hampir seragam seperti pada kasus spiral melingkar berspasi dekat. Dalam kasus ini tekanan rata-rata dan tekanan seragam ekivalen menjadi sama. Koefisien k_2 juga mendekati satu untuk susunan lain, seperti penulangan persegi dengan batang tulangan logitudinal terdistribusi merata dan tersupport dengan spasi berjarak dekat.

$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right)\left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0 \quad (10)$$

Tekanan seragam ekivalen pada Persamaan (8) berlaku untuk penampang bujur sangkar dan melingkar yang mempunyai tekanan kekangan yang sama di kedua sumbu tegak lurus. Untuk penampang yang tidak mempunyai tekanan yang berbeda di kedua sumbu tegak lurus akibat susunan sengkang yang berbeda di kedua arah, rata-rata tegangan dapat digunakan sebagai berikut:

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{cx} + f_{ley} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (11)$$

dimana f_{lex} dan f_{ley} yang bekerja tegak lurus pada dimensi inti beton b_{cx} dan b_{cy} dapat dihitung terpisah.

4.3 Indeks Kekangan Efektif

Indikator efisiensi kekangan pada kolom beton bertulang adalah :

- Menurut Park et al 1982, Mugeruma et al 1983, Saatcioglu et al 1993 adalah

$$= \frac{\rho_h f_{yh}}{f_c'} \quad (12)$$

- Menurut Cusson (1994) = $\frac{f_{le}}{f_{co}}$ (13)

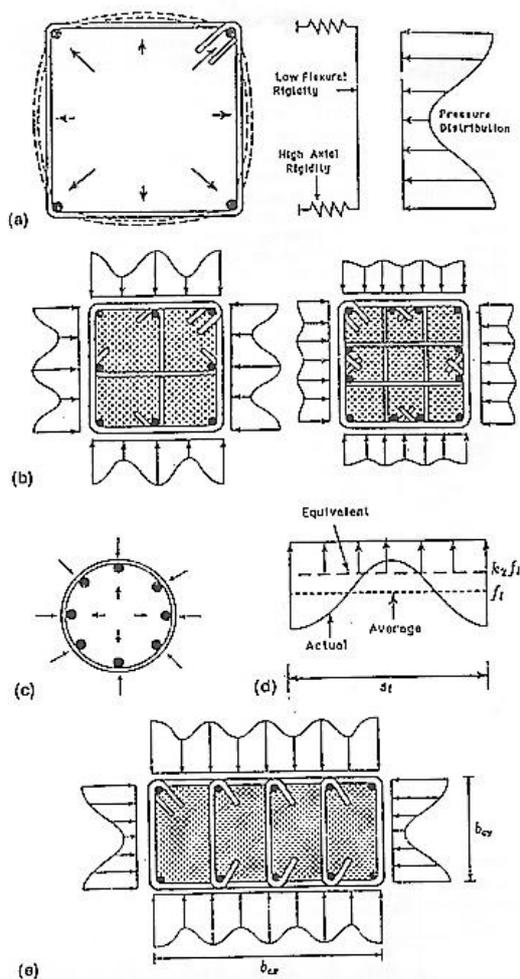
- Menurut Yong (1988) = $\frac{f_o}{f_c'}$ (14)

dimana ρ_h adalah rasio volume tulangan transversal, f_{yh} adalah tegangan leleh sengkang, f_{co} dan f_o adalah tegangan puncak pada kurva stress-strain kolom terkekang menurut Cusson (1994) dan Yong (1988), dan f_c' dan tegangan puncak pada silinder beton. Tipikal kekangan pasif diperlihatkan pada Gambar 6.

Indeks yang diusulkan oleh Park et al (1982) dkk hanya dapat dipakai untuk kasus dimana tulangan transversal sudah leleh saat beton terkekang mencapai tegangan maksimal/puncak yang biasa terjadi untuk kasus beton mutu normal. Untuk kasus beton mutu tinggi, hal ini cenderung untuk jarang terjadi. Hal lain adalah indeks ini akan mempunyai nilai yang sama untuk bentuk konfigurasi sengkang yang bervariasi padahal respon yang dihasilkan adalah berbeda.

Studi komparatif oleh Cusson (1995) membagi efektifitas kekangan menjadi tiga kategori:

1. Kekangan ringan : $0\% < \frac{f_{le}}{f_{co}} < 5\%$
2. Kekangan sedang : $5\% < \frac{f_{le}}{f_{co}} < 20\%$
3. Kekangan tinggi : $\frac{f_{le}}{f_{co}} > 20\%$



Gambar 6. Tekanan Kekangan Pasif (Saatcioglu and Razvi, 1992) : (a) Perkembangan tekanan kekangan pasif pada kolom bujur sangkar; (b) Variasi tekanan kekangan dengan susunan penulangan; (c) Tekanan lateral seragam pada kolom melingkar; (d) Tekanan seragam ekuivalen pada kolom bujur sangkar; (e) Tekanan kekangan pada kolom persegi.

Beton terkekang ringan (kelas 1) tidak menghasilkan peningkatan kekuatan dan sedikit daktilitas. Jenis kelas ini digunakan apabila desain gempa tidak menjadi keperluan. Beton terkekang cukup (kelas 2) menghasilkan peningkatan kekuatan yang moderat dan perilaku daktilitas pasca tegangan puncak. Beton terkekang tinggi (kelas 3) menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan dan perilaku pasca tegangan puncak yang sangat daktil.

Kedua kelas ini tepat digunakan untuk desain pada daerah gempa sedang dan berat.

5. TEGANGAN PADA TULANGAN TRANSVERSAL

Tekanan kekangan lateral yang dibutuhkan oleh beton mutu tinggi dapat secara signifikan lebih tinggi dari beton mutu normal. Kebutuhan ini biasanya dapat dipenuhi dengan menggunakan baja mutu tinggi daripada menaikkan rasio volume tulangan untuk menghindari sulitnya pengecoran. Dalam hal ini asumsi bahwa tulangan akan leleh pada saat tegangan puncak beton tidak akan akurat.

Baik Cusson (1994) maupun Razvi & Saatcioglu (1994) mengutarakan bahwa tulangan baja mutu tinggi tersebut dapat leleh atau tidak tergantung dari efektifitas kekangan dan mutu baja tersebut. Untuk beton mutu tinggi, tegangan pada tulangan transversal dapat leleh pada saat tegangan puncak beton terkekang adalah hanya untuk kasus beton terkekang baik. Untuk kasus kolom beton mutu tinggi terkekang ringan, regangan puncak ϵ_{cc} , dari beton terkekang adalah kecil. Sebagai hasilnya, regangan pada sengkang sebagai reaksi dari ekspansi beton juga kecil dan kemungkinan lebih kecil dari pada tegangan leleh baja. Di lain pihak, untuk kolom yang terkekang tinggi, regangan puncak, ϵ_{cc} , akan cukup besar untuk memungkinkan terjadinya tegangan leleh pada sengkang.

Untuk itu perlu dicari berapa tegangan baja sesungguhnya pada tulangan transversal saat beton terkekang mencapai tegangan puncak.

5.1 Cusson (1995)

Besar tegangan baja pada tulangan transversal sangat dipengaruhi oleh efektifitas kekangan f_{effco} yang dimiliki oleh kolom tersebut. Cusson mengembangkan algoritma iterasi untuk menentukan tegangan baja tersebut:

1. Hitung tekanan kekangan efektif f_{le} , dengan asumsi pada tulangan transversal $f_{hcc} = f_{yh}$.
2. Estimasi tegangan puncak beton terkekang, f_{cc} dan ϵ_{cc} yang terkait.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.0 + 2.1 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{0.7} \quad (15)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.21 \left(\frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{1.7} \quad (16)$$

3. Estimasi regangan ϵ_{hcc} dalam tulangan transversal melalui :

$$\epsilon_{hcc} = 0.5 \epsilon_{cc} \left[1 - \left(\frac{f_{le}}{f_{cc}} \right) \right] \quad (17)$$

4. Hitung tegangan f_{hcc} pada tulangan transversal melalui kurva hubungan tegangan-regangan sengkang.
5. Reevaluasi tekanan kekangan efektif, f_{le} , dengan harga tegangan f_{hcc} yang baru, hanya jika $f_{hcc} < f_{yh}$.
6. Ulangi langkah 2-5 sampai konvergen.

5.2 Saatcioglu (1999)

Saatcioglu berdasarkan analisa regresi pada data eksperimental merumuskan bahwa tegangan baja pada tulangan transversal pada saat beton terkekang mencapai tegangan puncak adalah :

$$f_s = E_s \left(0.0025 + 0.04 \sqrt[3]{\frac{k_2 \rho_c}{f_{co}}} \right) \leq f_{yt} \quad (18)$$

dimana :

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sx})_i + \sum_{i=1}^m (A_{sy})_i}{[s(b_{cx} + b_{cy})]} \quad (19)$$

dimana n dan m adalah jumlah lengan tie pada arah sumbu-x dan sumbu-y.

$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s} \right) \left(\frac{b_c}{s_l} \right)} \leq 1.0 \quad (20)$$

6. PENENTUAN RASIO KUAT TEKAN ANTARA BETON POLOS SILINDER DENGAN KOLOM BETON POLOS

Kuat tekan beton di bawah beban monoton yang di tes dalam eksperimental berskala besar pada umumnya lebih rendah daripada kuat tekan beton pada tes standar silinder 150 x 300 mm. Pengujian itu antara lain :

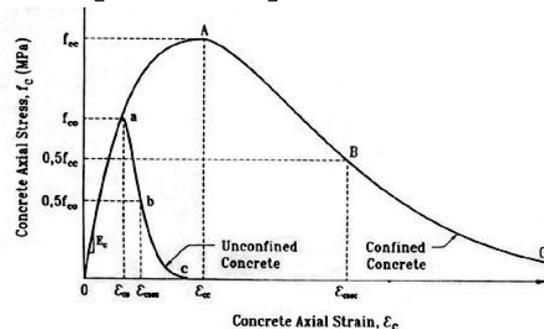
1. Razvi dan Saatcioglu (1998) mengambil harga kuat tekan kolom beton polos f_{co} sebesar $0,85 f_c'$ dengan hasil yang cukup memuaskan pada hasil analisa.
2. Yong et al. (1988) menyatakan rasio antara kuat tekan beton polos f_c'' terhadap kuat tekan beton silinder adalah mempunyai rentang 0,87-0,97 dengan rata-rata sebesar 0,92.
3. Cusson et al (1994) mnguji empat benda uji 235 x 235 x 470 mm prisma beton polos dan mendapatkan bahwa rata-rata kuat tekan dari benda uji tersebut adalah sebesar 88% dari kuat tekan beton silinder. Dalam analisa studinya, dipakai rasio sebesar 0,85 seperti yang dianjurkan oleh ACI.

7. MODEL HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN

7.1 Cusson (1995)

Seperti terlihat pada Gambar 7, bagian kurva menaik (OA) adalah :

$$f_c = f_{cc} \left[\frac{k \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)}{k - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^k} \right] ; \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (21)$$



Gambar 7. Pemodelan hubungan Stress-Strain oleh Cusson (1995)

$$k = \frac{E_c}{E_c - \left(\frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}\right)} \quad (22)$$

dimana k mengatur kemiringan awal dan kurvatur dari bagian menaik ini. E_c adalah modulus tangensial beton. Untuk beton mutu tinggi, koefisien k bernilai besar yang mengekspresikan bahwa bagian menaik cenderung linier dengan modulus elastis yang besar.

Bagian menurun (ABC) adalah modifikasi dari Fafitis dan Shah (1985) :

$$f_c = f_{cc} \cdot \exp\left[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_2}\right] ; \varepsilon_c \geq \varepsilon_{cc} \quad (23)$$

$$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\varepsilon_{c50c} - \varepsilon_{cc})^{k_2}} \quad (24)$$

$$k_2 = 0.58 + 16\left(\frac{f_{le}}{f_{co}}\right)^{1.4} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{c50c} = \varepsilon_{c50u} + 0.15\left(\frac{f_{le}}{f_{co}}\right)^{1.1} \quad (26)$$

$$\text{dimana } f_{hcc} = f_{yh} \quad (27)$$

$$\varepsilon_{hcc} = \nu \varepsilon_{cc} - \frac{(1 - \nu)f_{le}}{E_{sec}} \quad (28)$$

Koefisien k_1 mengatur kemiringan umum dari bagian menurun dan membuat kurva tegangan-regangan melewati titik (ε_{c50c} ; $0.5f_{cc}$) dengan asumsi bahwa pada titik ini kondisi leleh sudah terjadi pada tulangan transversal. Untuk beton terkekang baik, k_1 adalah besar dan menghasilkan alur yang menurun halus, sementara untuk terkekang ringan, k_1 adalah kecil dan menghasilkan alur yang menurun tajam. Koefisien k_2 mengontrol kurvatur dari bagian menurun. Untuk beton terkekang baik, k_2 berharga besar dan menghasilkan alur menurun yang cembung, sedangkan untuk beton terkekang ringan, k_2 berharga kecil dan menghasilkan alur menurun yang cekung.

7.2 Saatcioglu (1999)

Confinement model yang diusulkan oleh Saatcioglu (Gambar 8) berdasar pada

penghitungan tekanan seragam ekuivalen yang memberi efek yang sama dengan tekanan kekangan tak seragam.

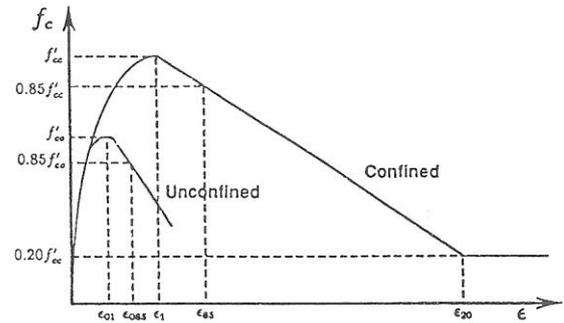


FIG. 3. Proposed Model

Gambar 8. Pemodelan hubungan Stress-Strain oleh Saatcioglu (1999)

- Bagian kurva naik yang diusulkan oleh Saatcioglu mempunyai bentuk yang sama dengan ascending part kurva stress-strain oleh Cusson (1995) :

$$f_c = \frac{f_{cc} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1}\right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1}\right)^r} \quad (29)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (30)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_1} \quad (31)$$

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (32)$$

dimana E_{sec} adalah modulus elastis sekan dari beton terkekang, dan E_s adalah modulus elastis tangensial dari beton tak terkekang.

- Bagian kurva turun adalah bagian yang diatur untuk bermula dari titik tegangan puncak dan regangan yang terkait (ε_1 , f'_{cc}) melewati titik (ε_{85} , $0.85 f'_{cc}$)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01}(1 + 5k_3K) \quad (33)$$

$$\varepsilon_{85} = 260k_3\rho_c\varepsilon_1[1 + 0.5k_2(k_4 - 1)] + \varepsilon_{085} \quad (34)$$

di mana:

$$k_3 = \frac{40}{f_{co}} \leq 1.0 \quad (35)$$

$$k_4 = \frac{f_{yt}}{500} \geq 1.0 \quad (36)$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_{co}} \quad (37)$$

$$\varepsilon_{01} = 0.0028 - 0.0008k_3 \quad (38)$$

$$\varepsilon_{085} = \varepsilon_{01} + 0.0018k_3^2 \quad (39)$$

ρ_c diambil dari persamaan (19)

Perumusan kurva tegangan-regangan untuk descending part adalah:

$$f_c = f'_{cc} - 0.15 f'_{cc} \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_1}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_1} \right) \quad (40)$$

Pengambilan titik pada ε_{85} diambil berdasarkan asumsi dari eksperimental bahwa meskipun tulangan transversal tidak leleh pada saat tegangan puncak, tapi akan meleleh pada saat atau sebelum permulaan *decay* pada concrete.

□ Bagian datar

Bagian ini diambil setelah regangan aksial mencapai regangan dimana tegangan aksial turun dan mencapai 0.2 f'_{cc} .

8. PERBANDINGAN DENGAN HASIL EKSPERIMENTAL

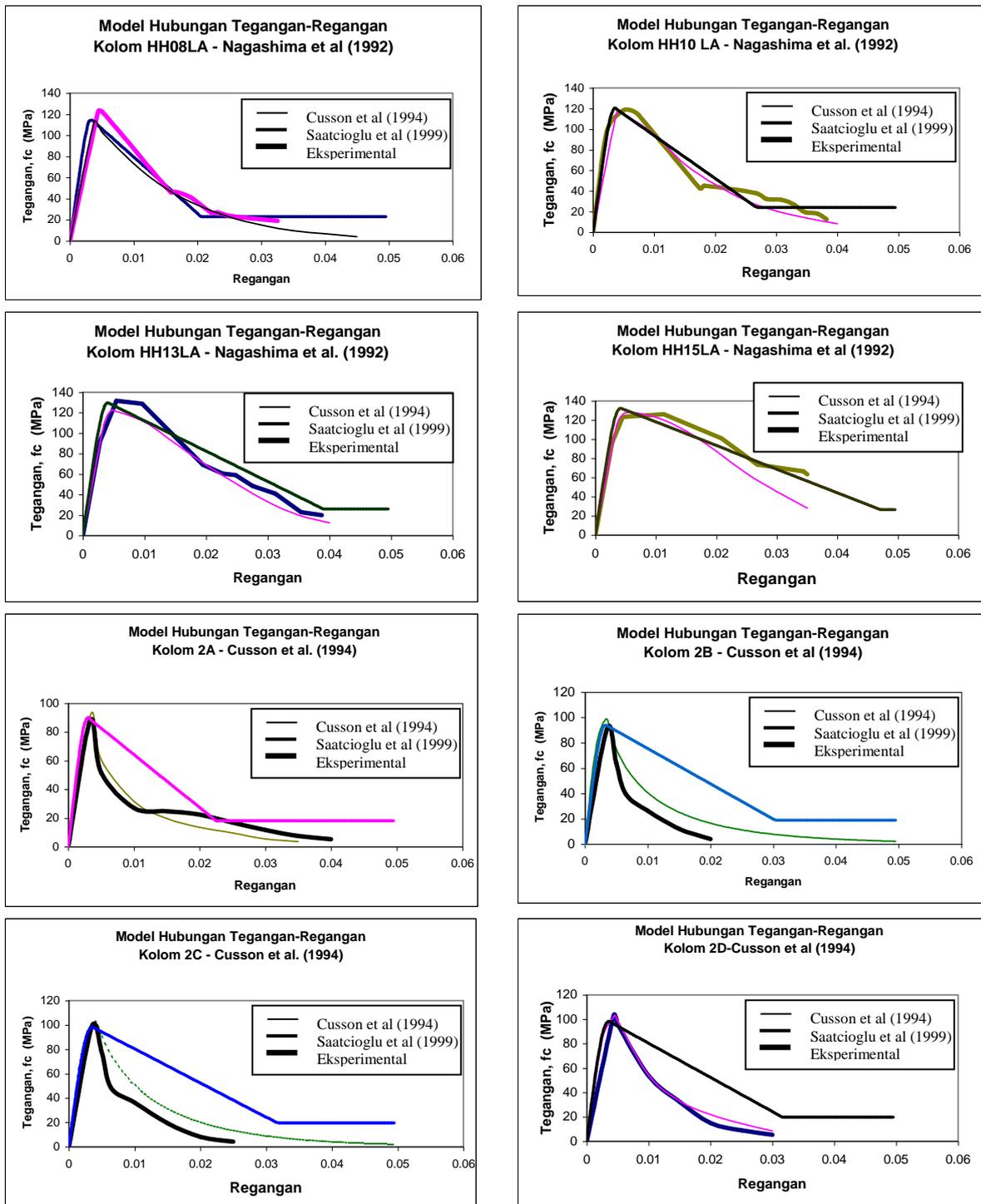
Tabel 1 menyajikan karakteristik dan dimensi dari 20 benda uji dari eksperimental yang dilakukan oleh Naghasima et al. (1992). Hasil eksperimental dari kedua puluh benda uji ini akan diperbandingkan dengan prediksi dari analisa oleh Cusson (1995) dan Saatcioglu (1999). Hasilnya seperti tampak pada tabel 2. Kedua usulan model menunjukkan hasil yang cukup akurat terhadap hasil eksperimental, dengan usulan model oleh Saatcioglu (1999) menunjukkan hasil yang sedikit lebih akurat dibandingkan dengan Cusson (1995).

Tabel 1. Data dimensi dan karakteristik benda uji kolom terkekang beton mutu tinggi oleh Nagashima et al. (1992)

Column label	Reinf.	b_c	d_b	s_1	s	f_{yt}	f_i	f'_{co}	f'_{cc}			Rasio	
									Exp.	Cusson	Saatcioglu	Cusson	Saatcioglu
HH08LA	12-bar	199.9	5.1	61.6	55	1387	7.13	98.8	122.8	113.6	114.6	0.93	0.93
HH10LA	12-bar	199.9	5.1	61.6	45	1387	8.71	98.8	122.5	116.6	119.7	0.98	0.98
HH13LA	12-bar	199.9	5.1	61.6	35	1387	11.20	98.8	131.5	123.5	128.6	0.94	0.98
HH15LA	12-bar	198.6	6.4	60.7	45	1368	13.33	98.8	127.0	128.4	130.0	1.01	1.02
HH20LA	12-bar	198.6	6.4	60.7	35	1368	17.14	100.4	148.2	174.7	144.9	1.18	0.98
HL06LA	12-bar	200	5.0	61.7	45	807	7.03	100.4	118.2	117.5	121.3	0.99	1.03
HL08LA	12-bar	200	5.0	61.7	35	807	9.04	100.4	133.2	123.5	129.4	1.02	0.97
LL05LA	12-bar	200	5.0	61.7	55	807	5.58	51.3	68.9	62.6	67.4	0.91	0.98
LL08LA	12-bar	200	5.0	61.7	35	807	9.04	51.3	79.4	80.5	80.3	1.01	1.01
LH08LA	12-bar	199.9	5.1	61.6	55	1387	6.92	51.3	70.9	63.1	67.8	0.89	0.96
LH13LA	12-bar	199.9	5.1	61.6	35	1387	11.20	51.3	85.7	95.4	83.5	1.11	0.97
HH13MA	12-bar	199.9	5.1	61.6	35	1387	11.20	100.4	131.8	124.5	130.2	0.91	0.99
HH13HA	12-bar	199.9	5.1	61.6	35	1387	11.20	100.4	129.2	124.5	130.2	0.91	1.01
LL08MA	12-bar	200	5.0	61.7	35	807	9.04	51.3	79.6	80.5	80.3	1.01	1.01
LL08HA	12-bar	200	5.0	61.7	35	807	9.04	51.3	78.0	80.5	80.3	1.03	1.03
LH15LA	12-bar	198.6	6.4	60.7	45	1368	13.33	52.4	88.7	101.1	86.1	1.14	0.97
HH13LB	12-bar	199.9	5.1	61.6	27	1387	12.39	100.4	131.7	125.5	137.4	0.95	1.04
HH13LD	8-bar	199.9	5.1	92.4	25	1387	13.38	100.4	128.2	123.5	134.4	1.03	1.05
LL08LB	12-bar	200	5.0	61.7	27	807	9.99	52.4	82.4	82.8	87.5	1.01	1.06
LL08LD	8-bar	200	5.0	92.5	25	807	10.79	52.4	77.3	81.2	85.0	1.07	1.10

Penghitungan pada tabel di atas adalah untuk melihat seberapa akurat penghitungan kuat tekan kolom beton terkekang pada masing-masing model. Kedua model

perumusan yang diusulkan oleh baik oleh Saatcioglu maupun Cusson mempunyai keakurasian yang cukup tinggi.



Gambar 9. Perbandingan antara hasil eksperimental Nagashima et al. (1992) dengan hasil analisis (model Saatcioglu et al. 1999 dan Cusson et al. 1995)

Perbandingan antara model hubungan tegangan-regangan berdasar model Saatcioglu et al. (1999) dan Cusson et al. (1995) dengan hasil eksperimental dapat dilihat pada Gambar 9. Terlihat bahwa kedua model cukup bagus mewakili kurva tegangan-regangan hasil eksperimental,

hanya saja model Saatcioglu kurang dapat menggambarkan kurva tersebut apabila kuat tarik baja tulangan transversal tidak terlampaui tinggi.

9. KESIMPULAN

Telah dilakukan analisa perbandingan terhadap model-model hubungan tegangan-regangan untuk kolom terkekang beton mutu tinggi. Beberapa model hubungan tegangan-regangan secara singkat telah dipaparkan dan telah diperbandingkan hasilnya dengan hasil eksperimental oleh Nagashima et al. (1992). Kedua model Cusson (1995) dan Saatcioglu (1999) mempunyai pendekatan yang berbeda dalam memprediksi berapa besar kekangan yang dihasilkan oleh suatu susunan konfigurasi dan kandungan sengkang tertentu pada beton mutu tinggi.

Cusson (1995) mendekati dengan merumuskan fungsi reduksi sebagai fungsi dari rasio volumetrik antara daerah yang terkekang efektif dengan volume daerah penuh. Sedangkan Saatcioglu (1999) merumuskan fungsi reduksi sebagai fungsi dari spasi sengkang dan spasi dari tulangan longitudinal yang tersupport secara lateral. Dari perbandingan, terlihat bahwa kedua model dapat memprediksi perilaku kolom beton mutu tinggi terkekang dengan cukup baik.

10. DAFTAR PUSTAKA

- Saatcioglu, Murat and Razvi, Salim(1999). "Confinement Model for High Strength Concrete." *J. Struct Engrg.*, ASCE, 125(3), 281-289.
- Yong, Yook-Kong, Nour, Malakah G., and Nawy, Edward G. (1988). "Behaviour of Laterally Confined High-Strength Concrete under Axial Loads." *J. Struct Engrg.*, ASCE, 114(2), 332-351.
- Park, R., Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. *John Wiley & Sons*, New York. 769 pp.
- Cusson, Daniel and Paultre, Patrick (1994). "High Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties." *J. Struct Engrg.*, ASCE, 120(3), 783-803.
- Cusson, Daniel and Paultre, Patrick (1995). "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete." *J. Struct Engrg.*, ASCE, 121(3), 468-477.
- Saatcioglu, Murat and Razvi, Salim(1992). "Strength and Ductility of Confined Concrete." *J. Struct Engrg.*, ASCE, 118(6), 1590-1607.