

روش شبیه سازی خرابایی در تحلیل و طراحی مقاطع بتن آرمه

ایمان الیاسیان، دانشجوی دکترای مهندسی عمران سازه Eiman.Elyasian@gmail.com

روش شبیه سازی خرابایی یک روش موفق و سازگار و مفید برای آنالیز و طراحی اعضاء بتنی مسلح می باشد. مدل های خرابایی نمایش میدان تنش های واقعی ناشی از بارهای بکاربرده شده و شرایط تکیه گاهی هستند. این مدل ها مکانیسم انتقال بار را از یک عضو سازه ای را با تقریب زدن جریان نیروهای داخلی با استفاده از عضوهای فشاری برای نشان دادن جریان تنش های فشاری و عضوهای کششی برای نشان دادن تنش های کششی نمایش می دهند.

اعضاء غیر خمشی مانند تیرهای عمیق و کربل ها و اتصالات و نواحی انتهایی شاه تیرهای پیش تنیده می باشند. در اعضاء غیر خمشی مقاطع مسطح بتن به صورت مسطح بعد از خمش باقی نمی ماند. بنابراین اصول آنالیز تنش استفاده شده برای عضوهای سطحی مفید هستند برای تعیین مقاومت اعضاء غیر خمشی بتنی مناسب نیستند. یکی از مشخصات اعضاء غیر خمشی مقاومت برشی آنها است که بیشتر از آنچه که با تئوری تیر سطحی بدست می آید است. مقاومت برشی زیادتر اعضاء غیر خمشی به واسطه قوس بندی داخلی (Arching) است که این جریان با انتقال بار به طور مستقیم به تکیه گاه بواسطه توسعه عضوهای فشاری است. میلگردها مانند اعضاء کششی عمل می کنند بنابراین اعضاء غیر خمشی می توانند شبیه به خرپا مدل شوند

مدل های خرابایی می تواند به آنالیز و طراحی موارد زیر کمک کند

1. تیرهای عمیق
 2. کربل ها
 3. اتصالات تیر- ستون در قابهای خمشی و کلاhek پایه های پل
 4. دیوارهای برشی با بازشوها
 5. پی های پایه های پل
 6. نواحی انتهایی یا بلوک های انتهایی تیرهای پیش و پس تنیده
- اعضاء فشاری مدل را Strut و اعضاء کششی را Tie می نامند که در گره های فرضی بهم متصل شده اند. Strut ها را با خط چین و Tie ها با خط ممتد نمایش داده می شود.

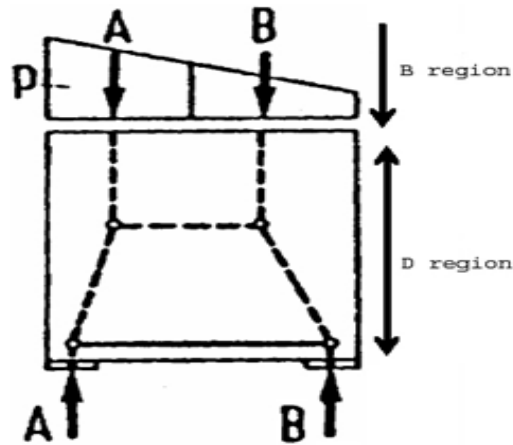
در بخشهایی از یک عضو بتنی که نزدیک تکیه‌گاه باشد یا تغییرات ناگهانی در ابعاد ایجاد شده باشد و یا بار متمرکزی اعمال گردد، فرضیات ساده و معمول اعضای خمشی از قبیل توزیع خطی کرنشها برقرار نبوده و در این نواحی آشفستگی وجود دارد. این نواحی ناپیوستگی^۱ و یا آشفته^۲، نواحی Δ نامیده می‌شوند. گسترش این نواحی را می‌توان تا فاصله h یا عمق عضو از هر طرف محل ایجاد ناپیوستگی هندسی یا بارگذاری در عضو در نظر گرفت. سایر نواحی عضو در فواصل بین نواحی Δ ، نواحی B نامیده می‌شوند. ناحیه B در حالت کلی، هر قسمت از عضو خارج از ناحیه Δ ، ناحیه B است. در نواحی B تئوری تیر بکار می‌رود یعنی مقاطع صفحه‌ای به صورت صفحه باقی می‌مانند. تنشهای داخلی در این نواحی برآحتی می‌توانند از نیروهای مقاطع بدست آید. برای انتخاب مدل خرابایی قابل قبول برای ناحیه Δ سه روش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱- استفاده از مسیرهای تنش حاصل از آنالیزهای الاستیک

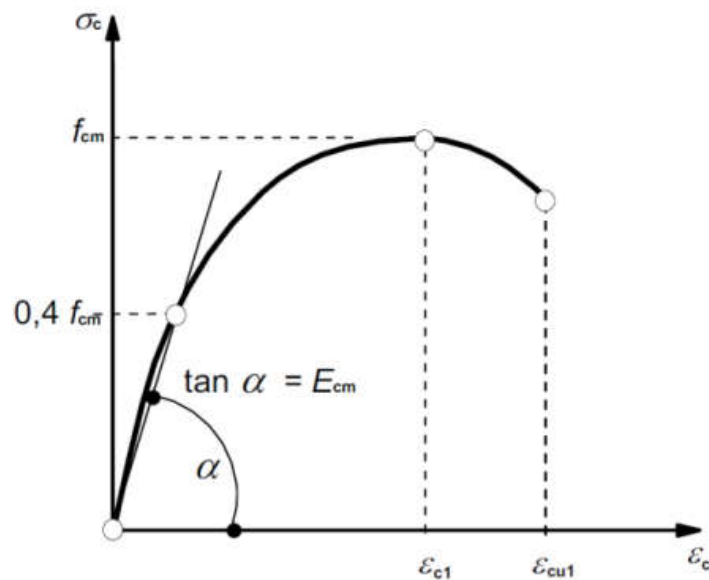
^۱ -Discontinuity

^۲ -Disturbed

- چون اعضای کششی نسبت به اعضای فشاری تغییر شکل پذیرترند یک مدل با کمترین عضو و کوتاهترین Tieها بهتر به نظر می‌رسد.



۲- استفاده از مدل‌های استاندارد: در این روش برای پیدا کردن مدل خرابایی مناسب، از مدل‌های خرابایی که بعضی از محققین با استفاده از برخی از آزمایشات خود بدست آورده‌اند استفاده می‌شود



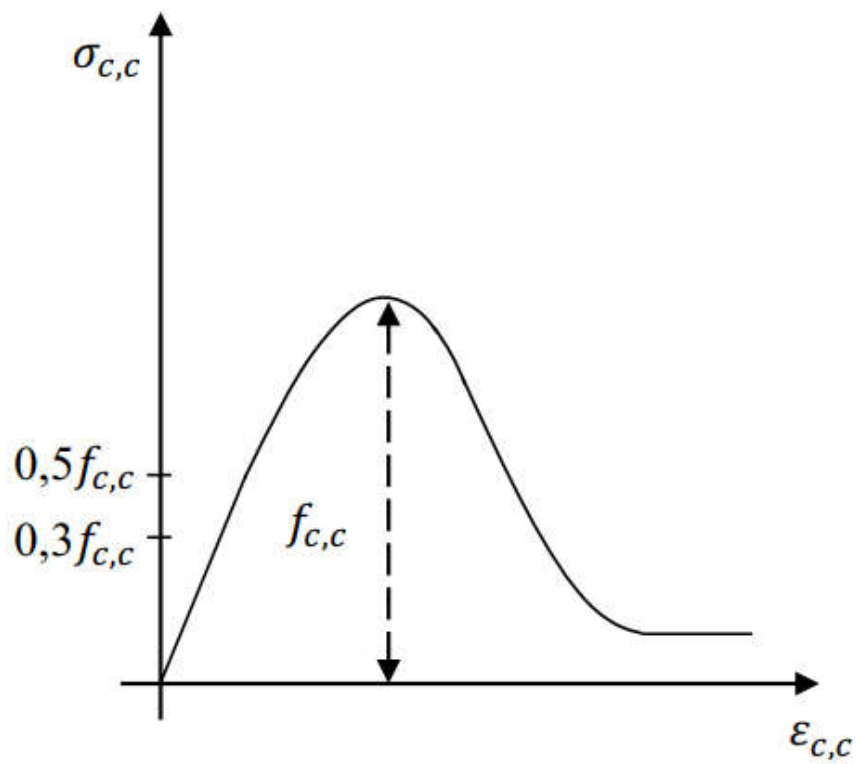
Idealized compressive stress-strain relationship for assessment of modulus of elasticity of concrete

as $\varepsilon_{c1} = 0.7 f_{cm}^{0.31} \leq 2.8 \text{ ‰}$

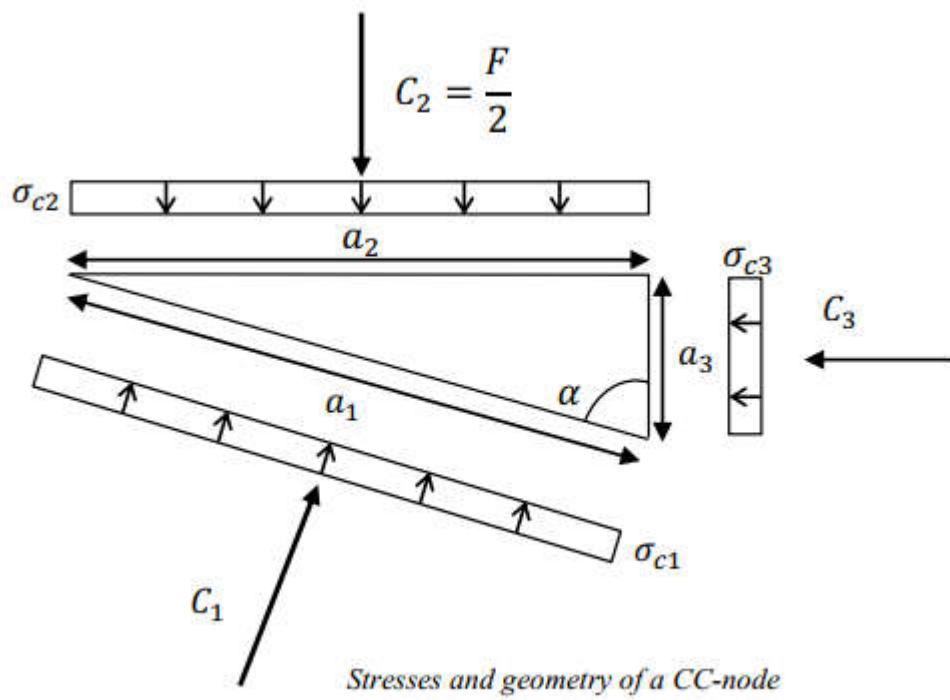
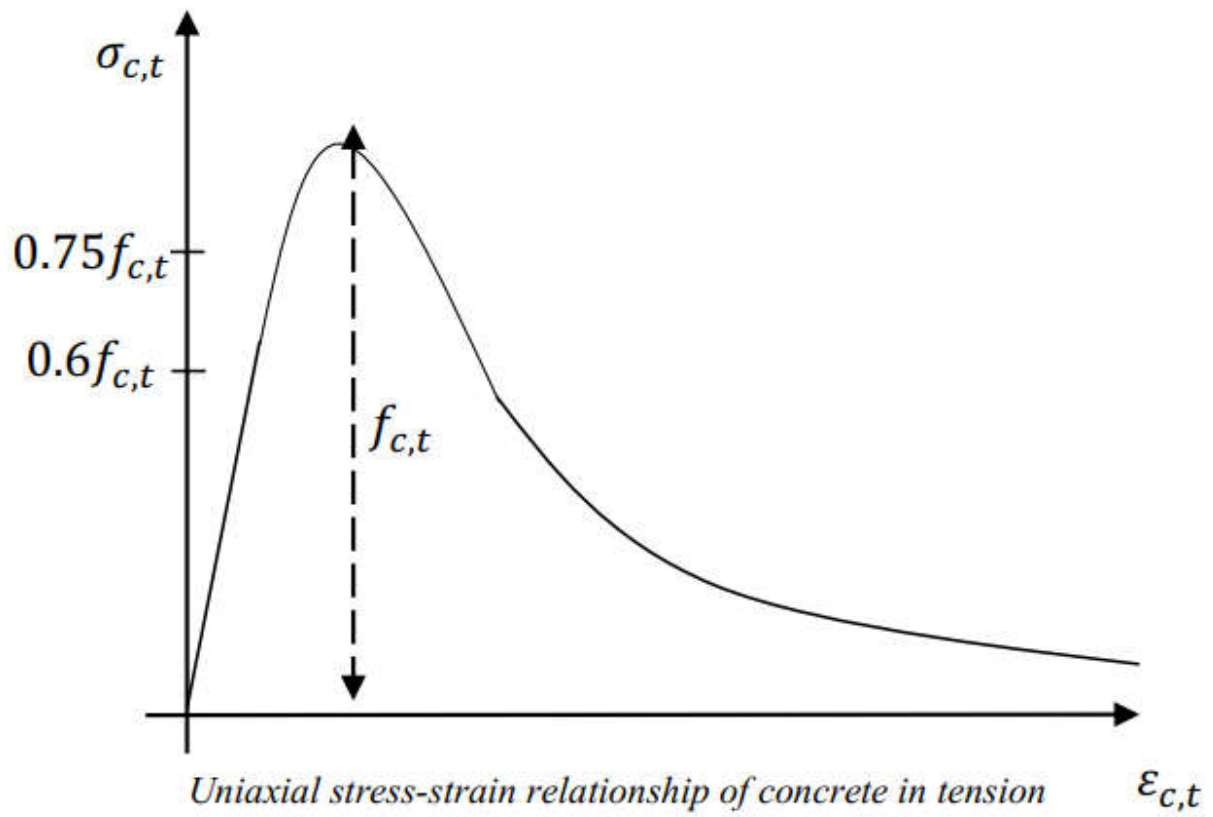
$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

$$k = 1.05 E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta}$$



Idealized stress-strain relationship of concrete subjected to uniaxial compression



$$C_1 = \frac{F/2}{\sin \alpha}$$

$$C_2 = F/2$$

$$C_3 = \frac{F/2}{\tan \alpha}$$

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 \cdot v' \cdot f_{cd}$$

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

$$\sigma_{Rd,max} \geq \sigma_{Ci} = \frac{C_i}{a_i \cdot b}$$

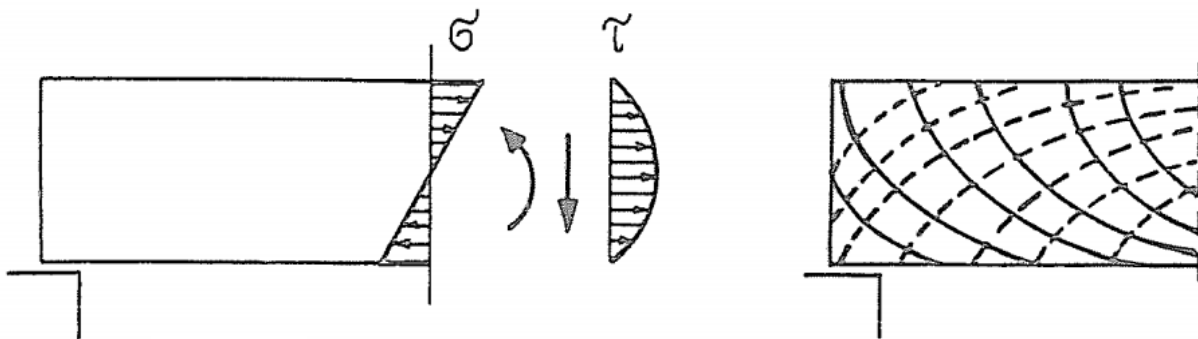
$$a_1 = \sqrt{a_2 + a_3}$$

$$a_2 = b_{loading\ plate}$$

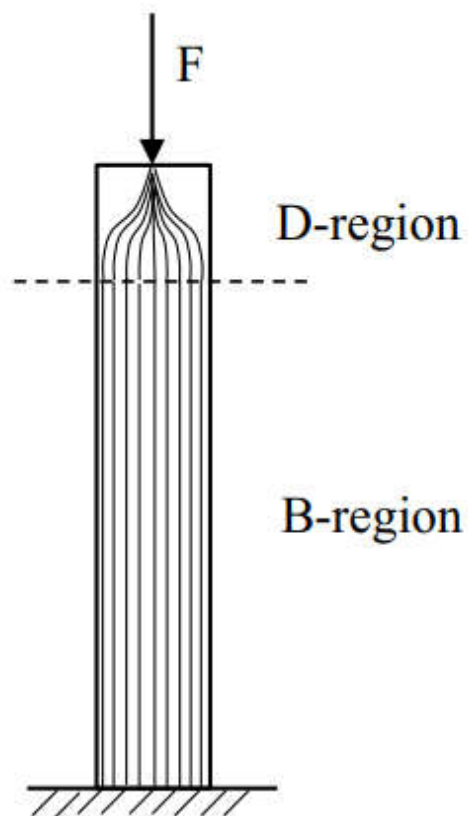
$$a_3 = \frac{a_2}{\tan \alpha}$$

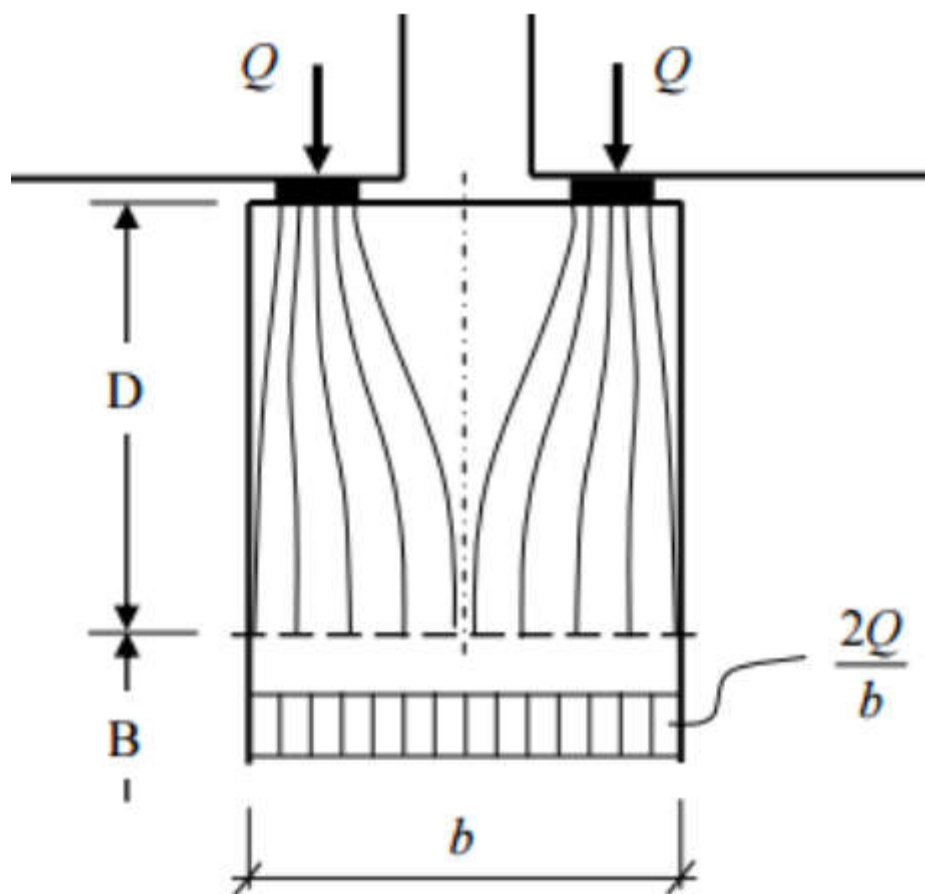
$$f_t = 0.3(f_c)^{2/3} \quad f_t = \frac{4}{145.0377} \cdot \sqrt{f_c}$$

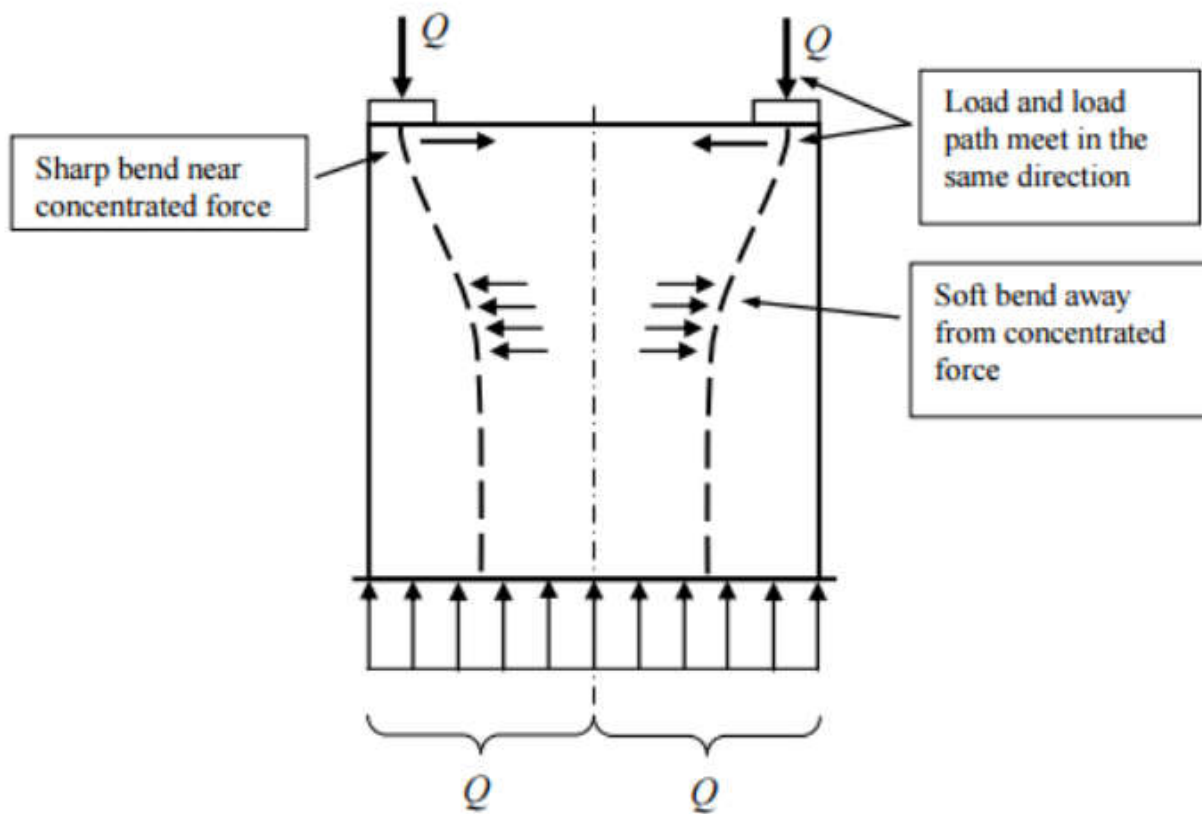
$$f_t = k(f_c)^n \quad n \text{ varies between } 0.5 - 0.75$$

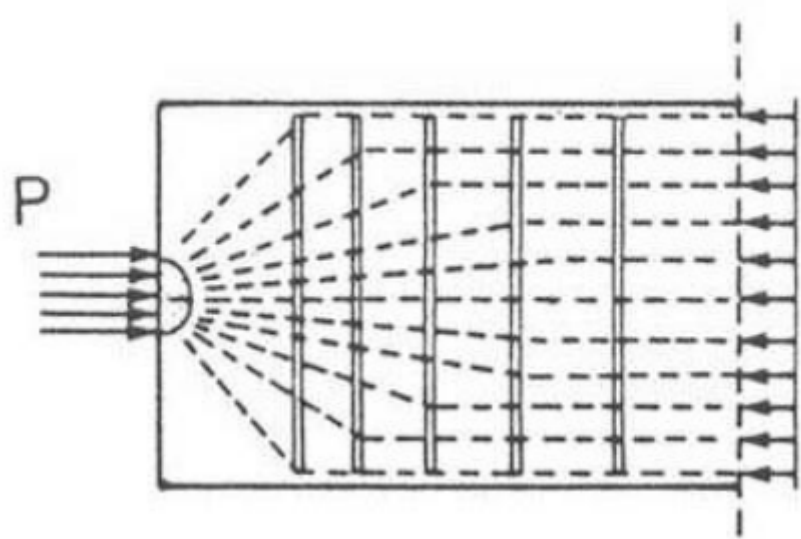
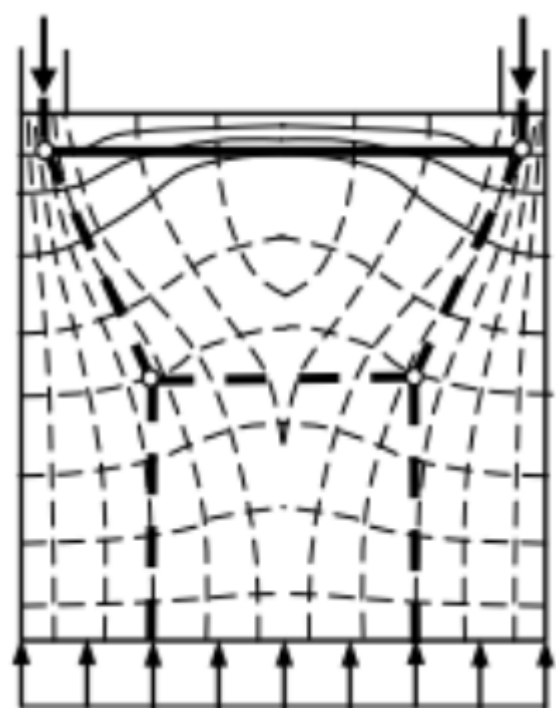


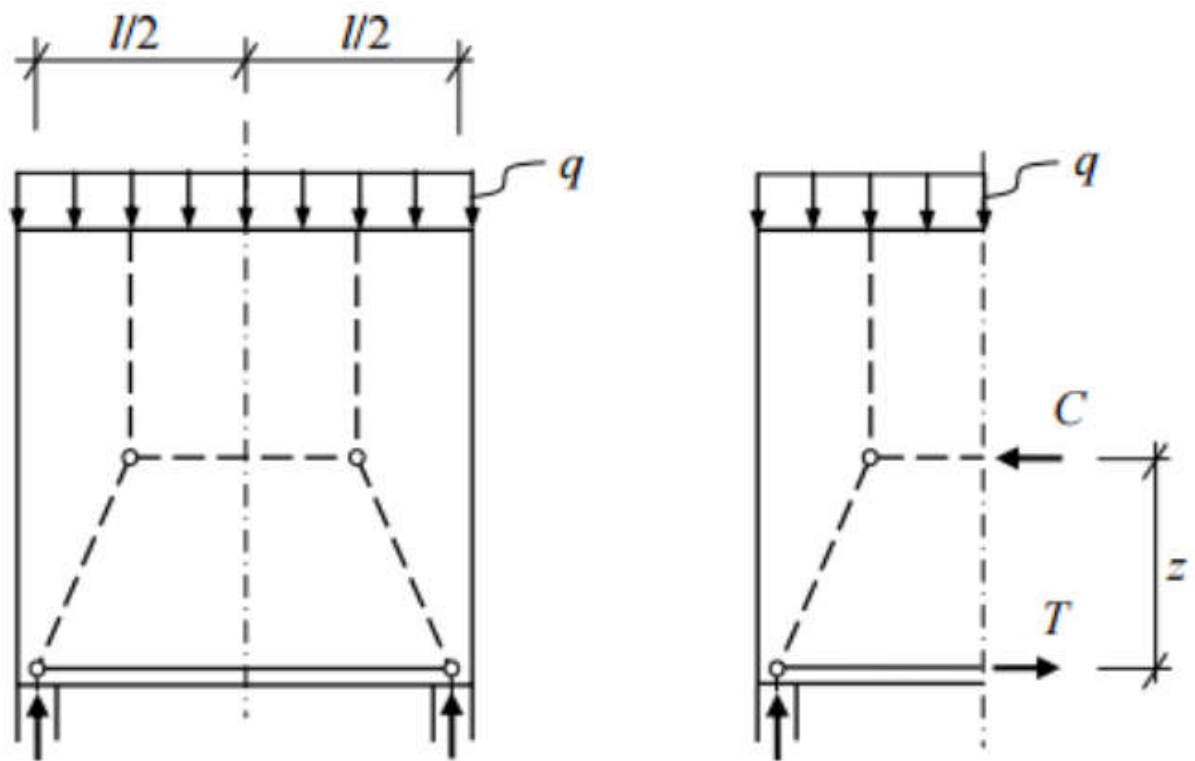
Elementary bending theory for prismatic beams









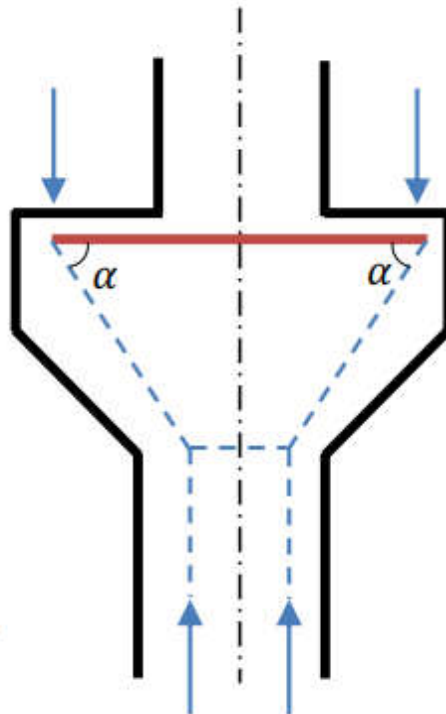
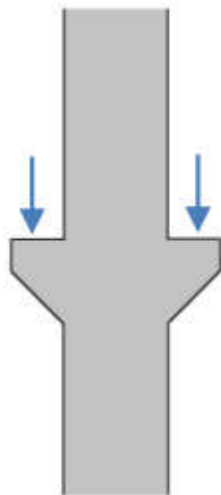


$$M_E = q \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{4}$$

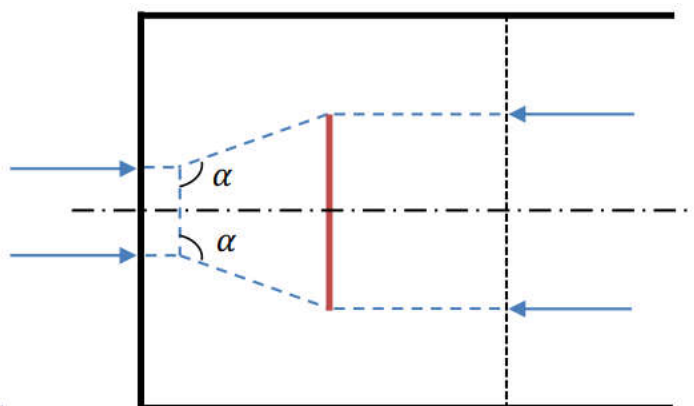
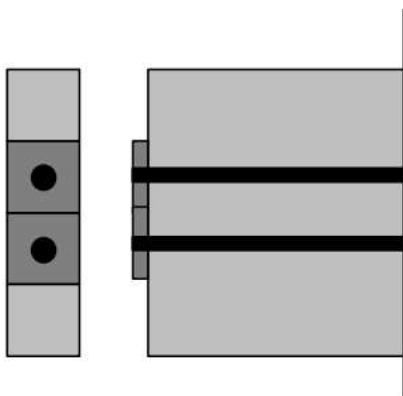
$$M_R = C \cdot z$$

$$f_{cd} > \sigma_c = \frac{F}{A_{strut}} \quad f_y > \sigma_s = \frac{T}{A_r}$$

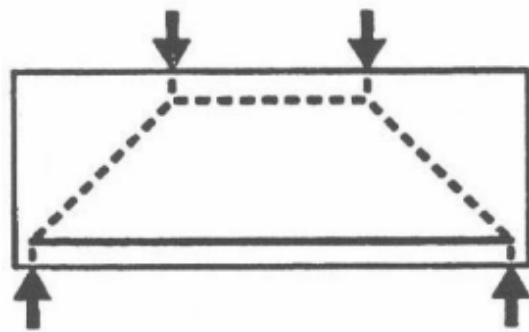
$$z = \frac{ql^2}{8} \cdot \frac{1}{T}$$



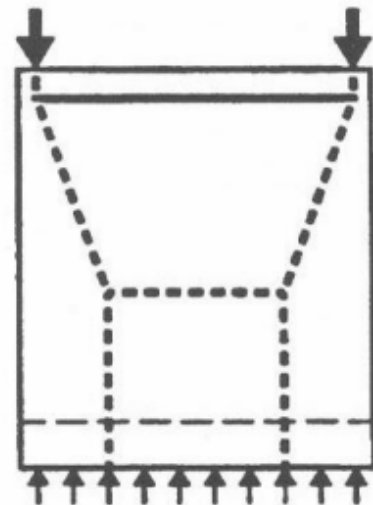
Strut-and-tie model in corbel



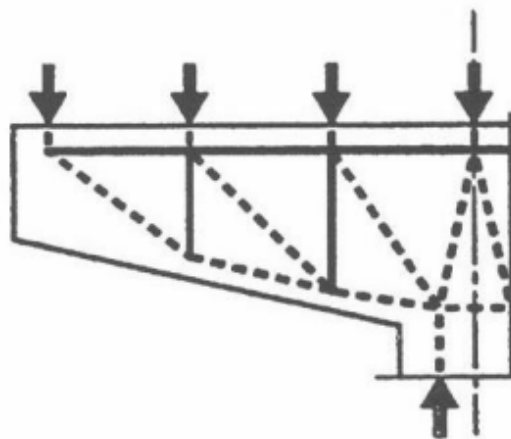
Strut-and-tie model in post-tensioned beam



a) Deep Beam

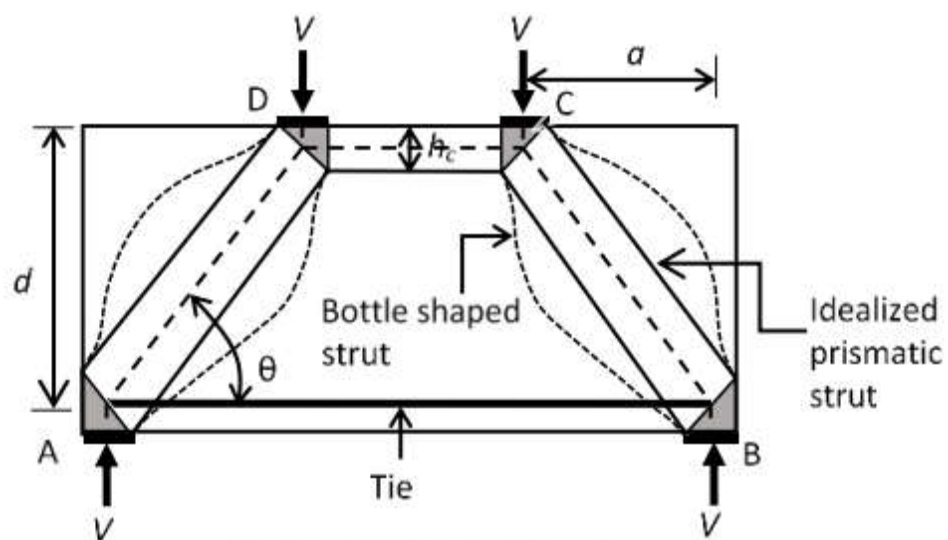


b) Post-Tensioned Member

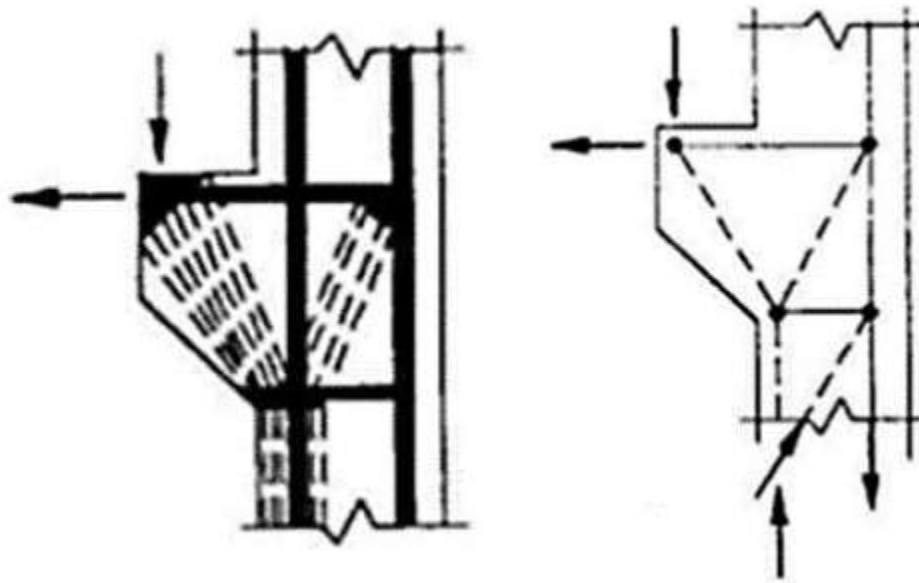


c) Pier Cap

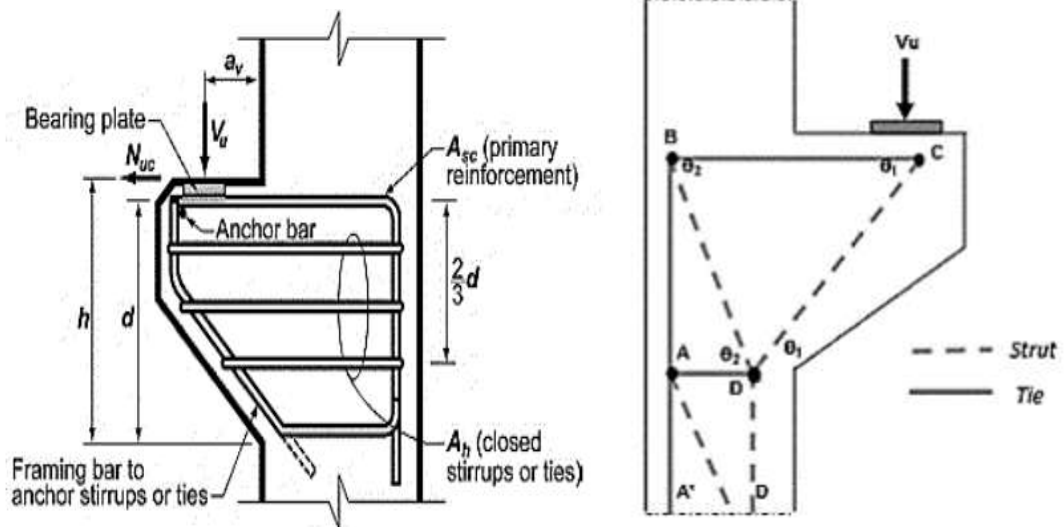
--- Compression Strut
— Tension Tie

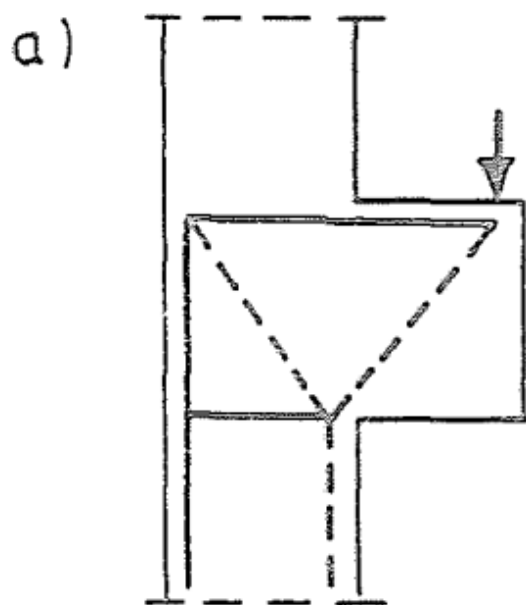


Typical STM for RC deep beam

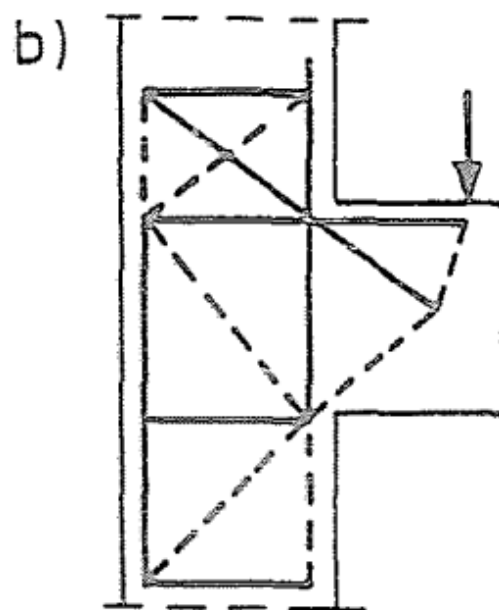


Standard truss model of the corbel.

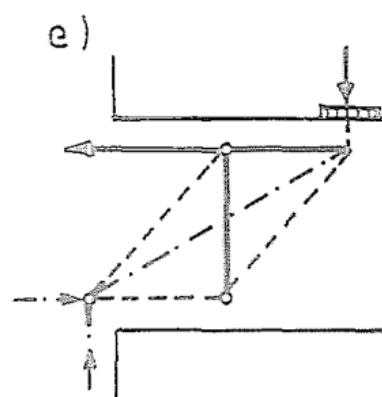
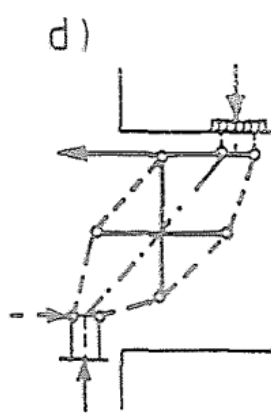
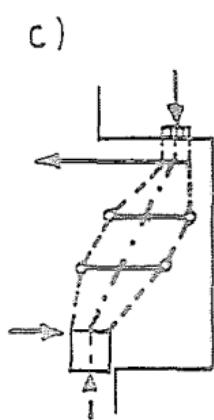




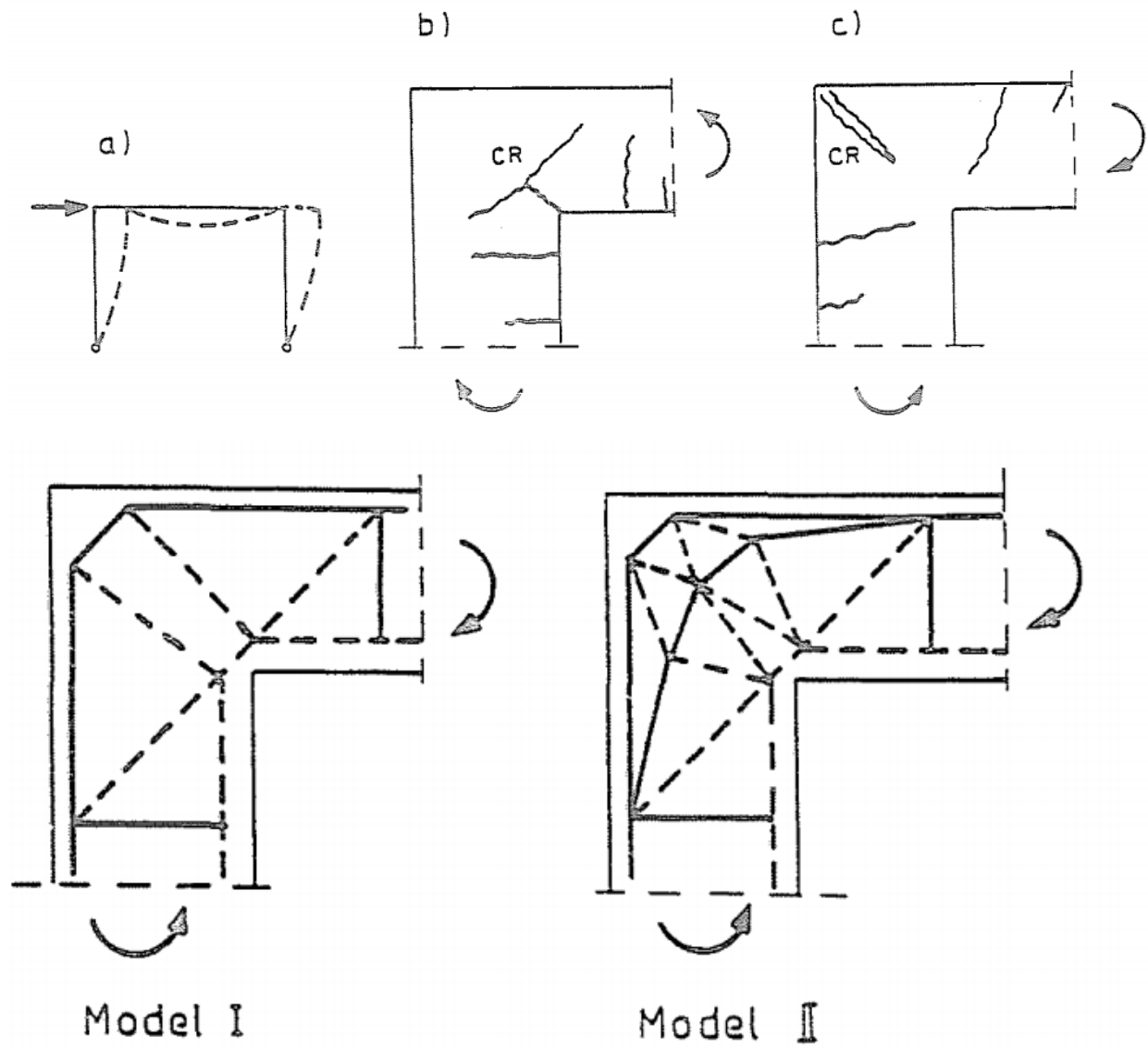
Model I



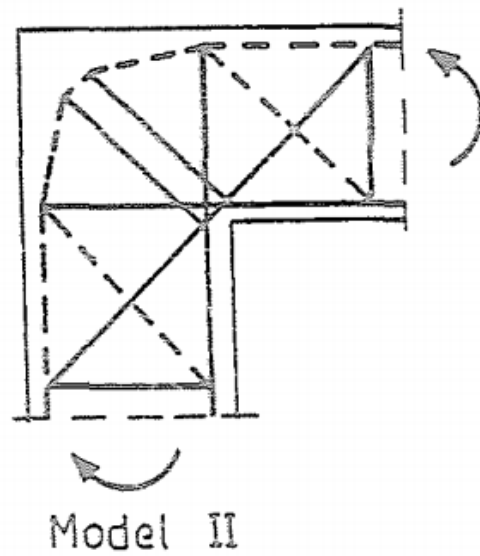
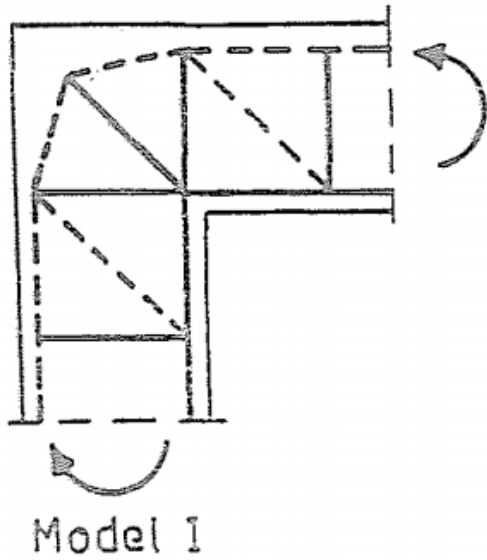
Model II



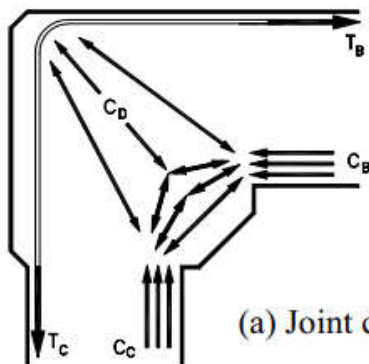
Alternative models of corbel and refinements of struts



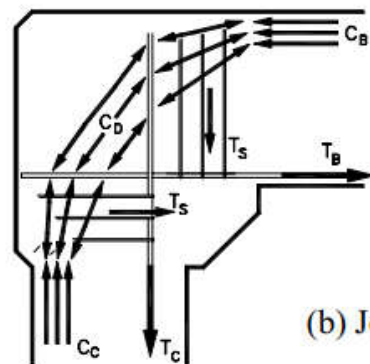
Alternative models for corners with 'closing' bending moment



Alternative models for corners with 'opening' bending moment

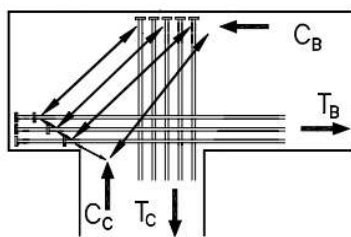


(a) Joint closing

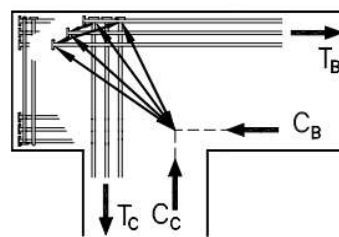


(b) Joint opening

Haunched-joint mechanism for a bridge knee joint.

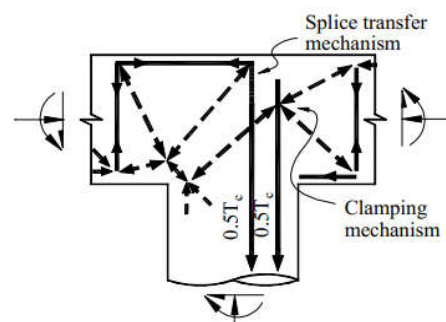


(a) Joint opening

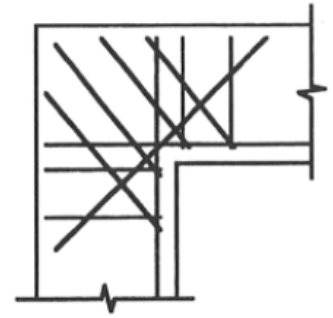
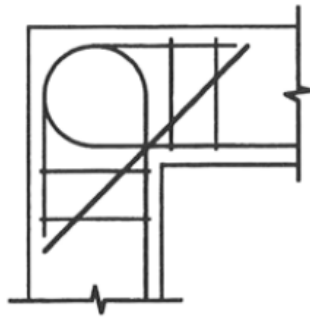
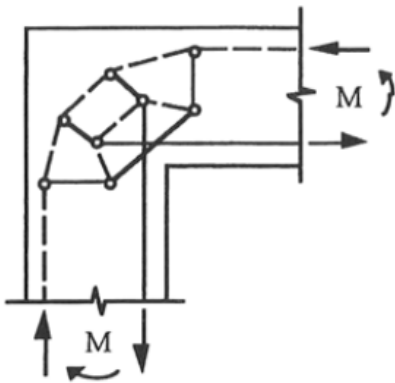
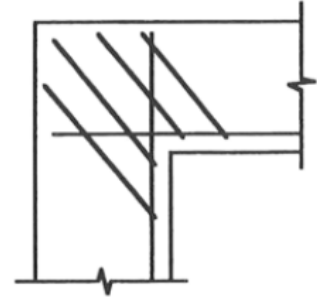
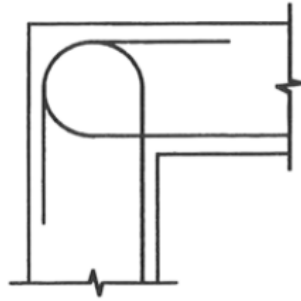
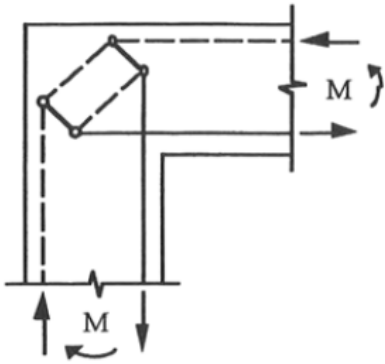
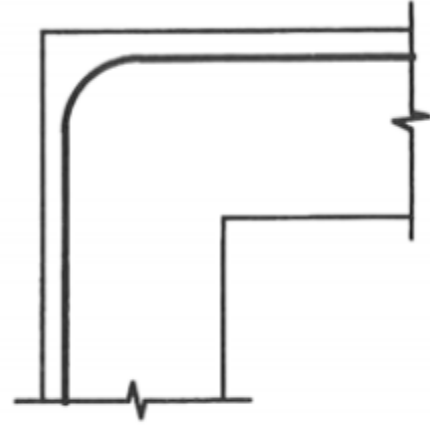
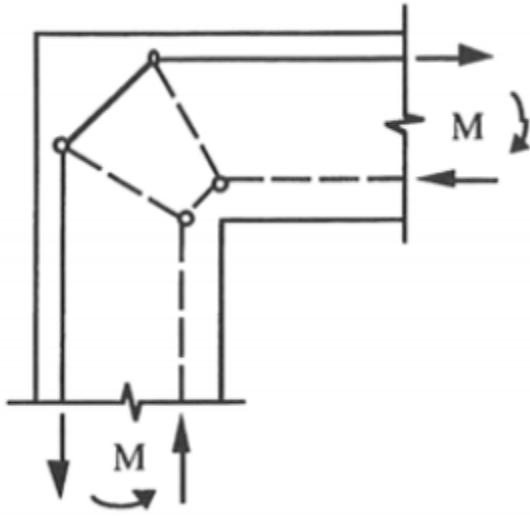


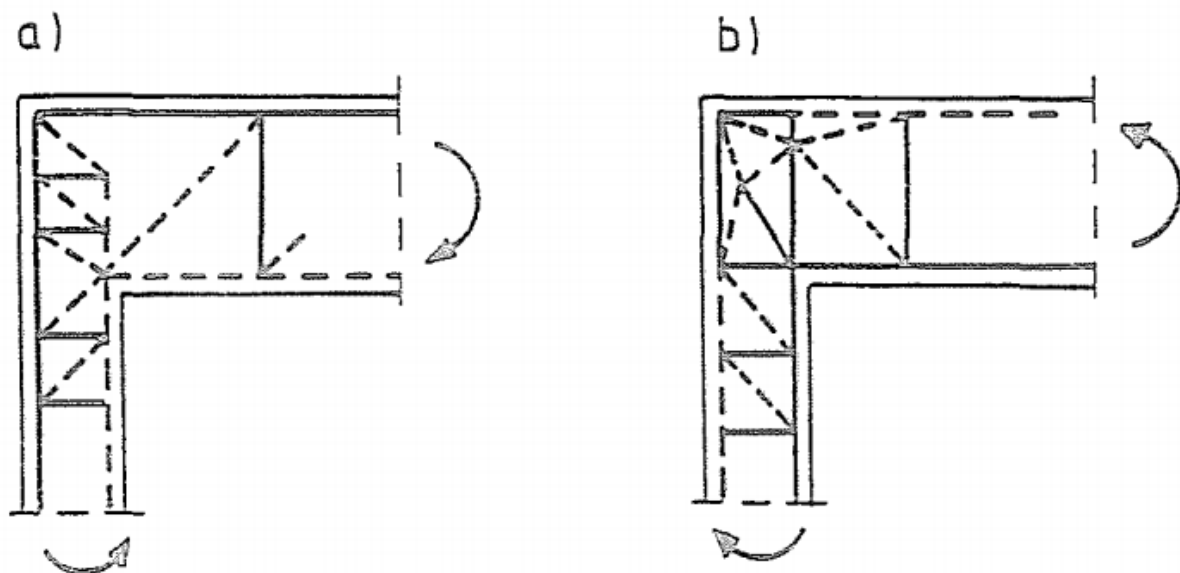
(b) Joint closing

Distributed strut mechanism for a bridge knee joint.

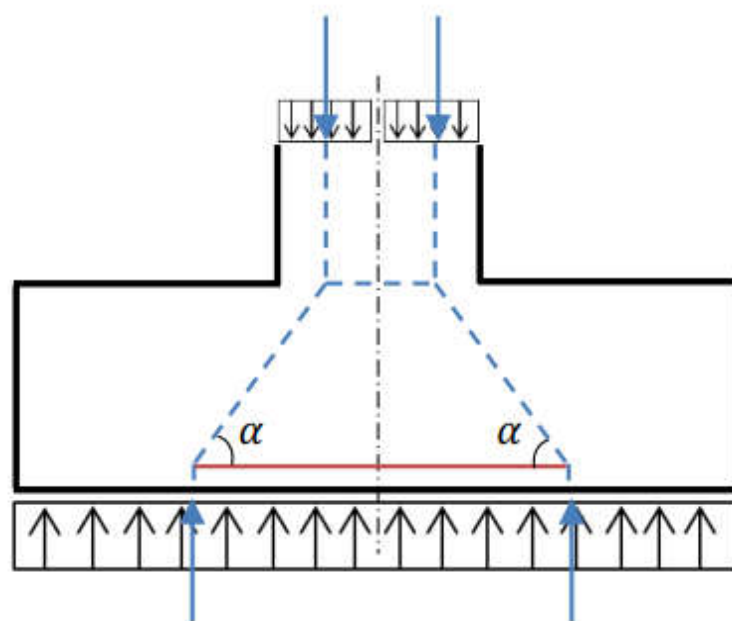


Modified external strut force transfer model for a bridge tee joint.





Influence of geometry proportion on the model



Strut-and-tie model of wall footing

مفروضات طراحی

برای طراحی مفروضات زیر در نظر گرفته می شود:

1. Tie ها پیش از خرد شدن اعضای فشاری تسلیم می شوند.

2. آرماتورها بطور مناسب مهار شده اند.

3. نیروها در Strut ها و Tie ها تک محوری هستند.

4. کشش در بتن در نظر گرفته نمی شود.

5. نیروهای خارجی در گره ها وارد می شوند.

6. پیش تنیدگی یک نیرو است .

مراحل طراحی

طراحی ناحیه D شامل چهار مرحله است:

1. معین و جدا کردن هر ناحیه D

2. محاسبه نیروهای برآیند روی مرز D

3. انتخاب یک مدل خرابایی برای انتقال نیروهای برآیند سرتاسر ناحیه D (محورهای Strut ها و Tie ها مدل باید

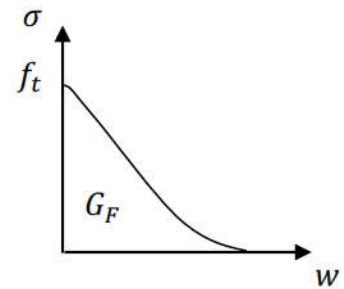
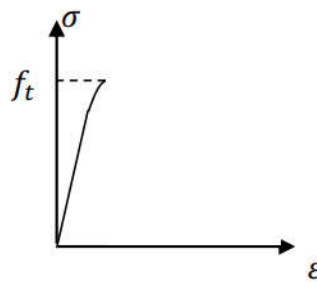
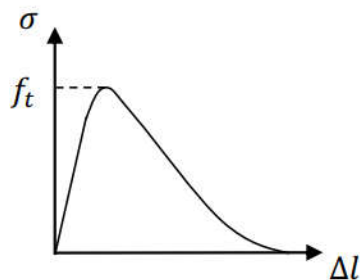
بترتیب بر محوهای میدانهای فشاری و کششی منطبق باشد).

4. نیروهای اعضای مدل محاسبه محاسبه می شود

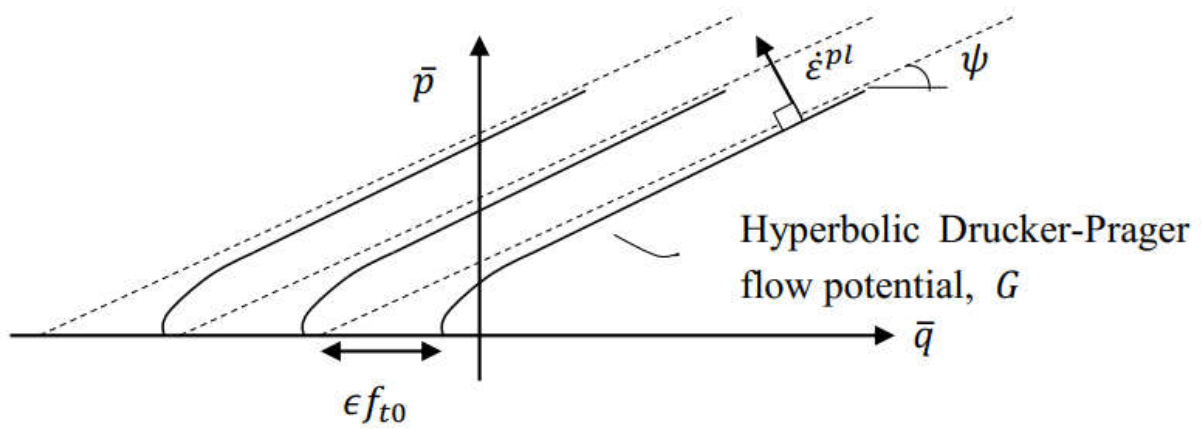
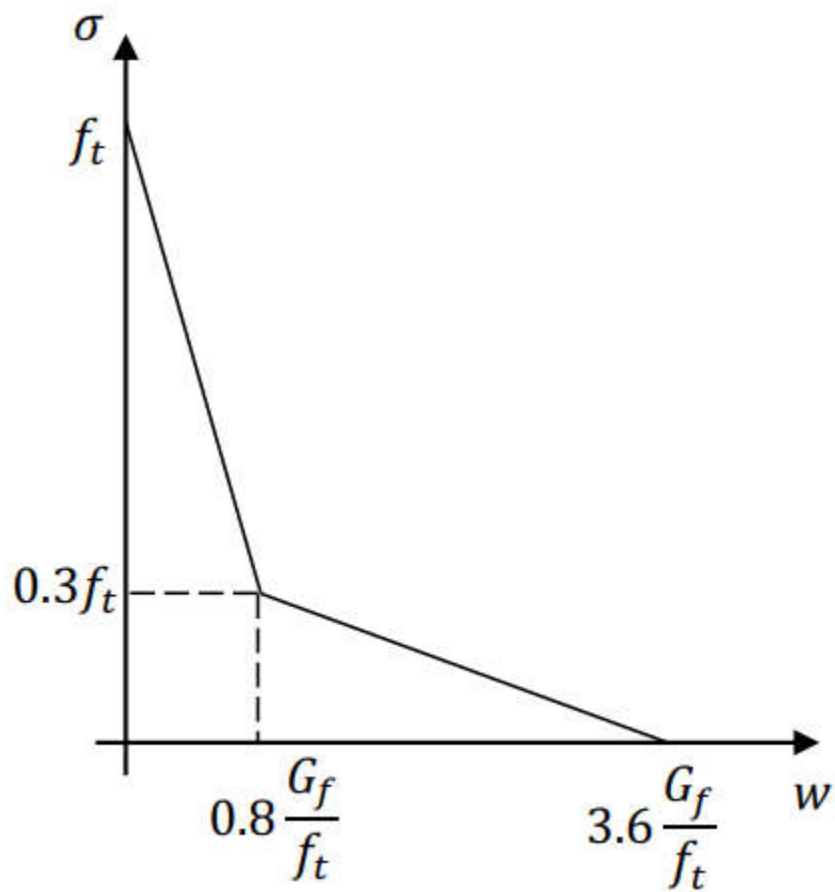
5. پهنای مؤثر Strut ها و نواحی گرهی با توجه به نیروهای مرحله 4 و مقاومت مجاز آنها تعیین می گردد و

آرماتورهای Tie مطابق مقاومت مجاز فولاد فراهم می شود. مقاومت مجاز Strut ها و نواحی گرهی و فولاد در

ادامه آورده می شود



$$G_f = \int \sigma \, dw \quad [\text{Nm/m}^2]$$



$$G = \sqrt{(\epsilon f_t \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi$$

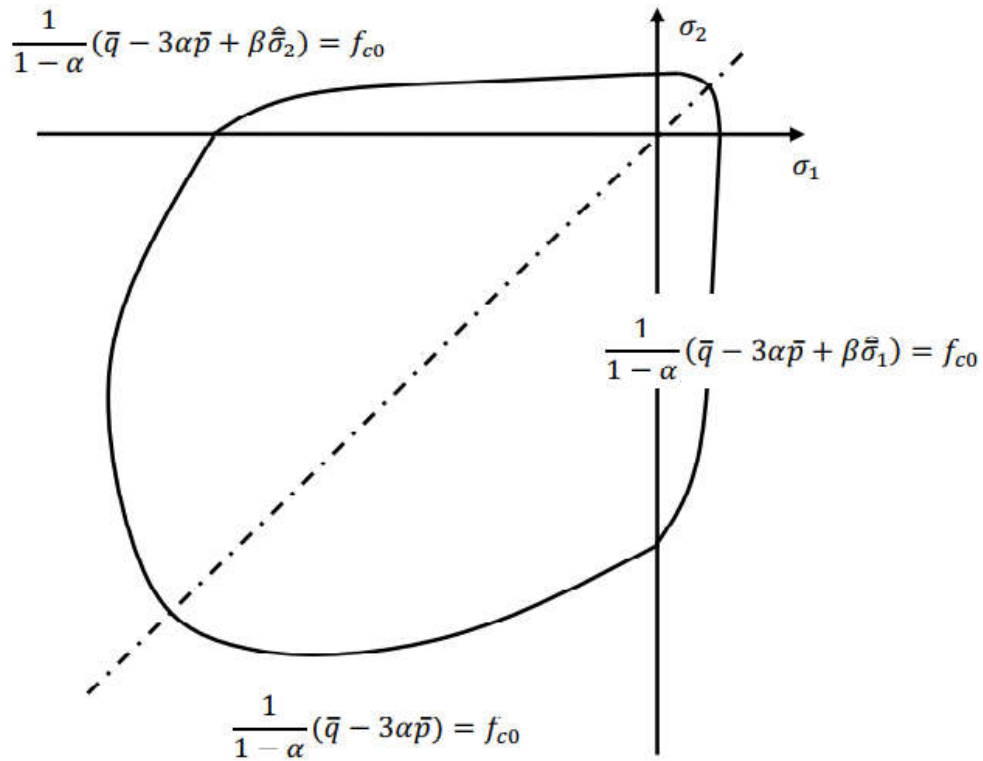
f_{c0} the initial uniaxial compressive yield stress

f_{b0} the initial equibiaxial compressive yield stress

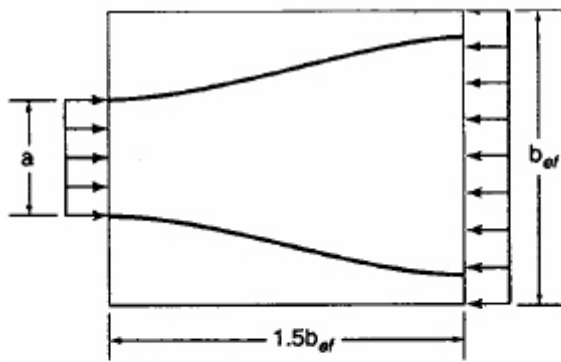
f_{t0} the uniaxial tensile stress at failure

α a dimensionless coefficient described as $\alpha = \frac{f_{b0} - f_{c0}}{2f_{b0} - f_{c0}}$

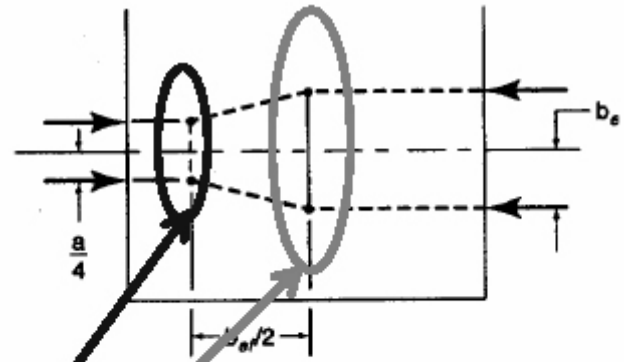
β a dimensionless coefficient, described as $\beta = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_t}(\alpha - 1) - (\alpha + 1)$



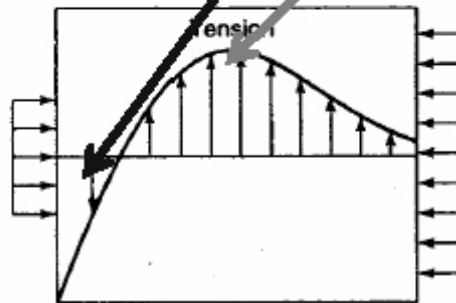
Biaxial yield surface, valid for plane stress conditions. Adopted from



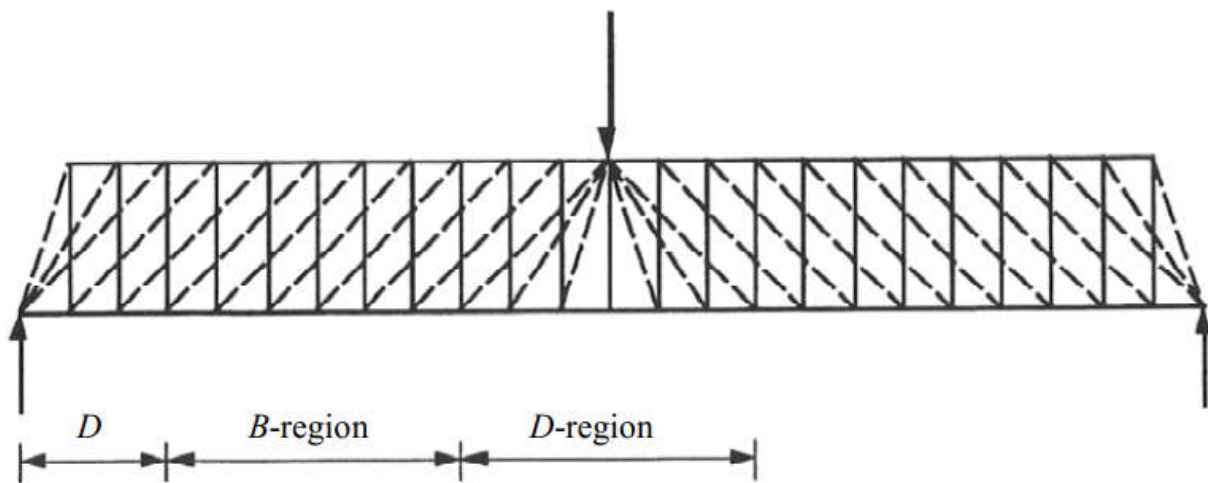
(a) Bottle-shaped region.



(b) Strut-and-tie model.

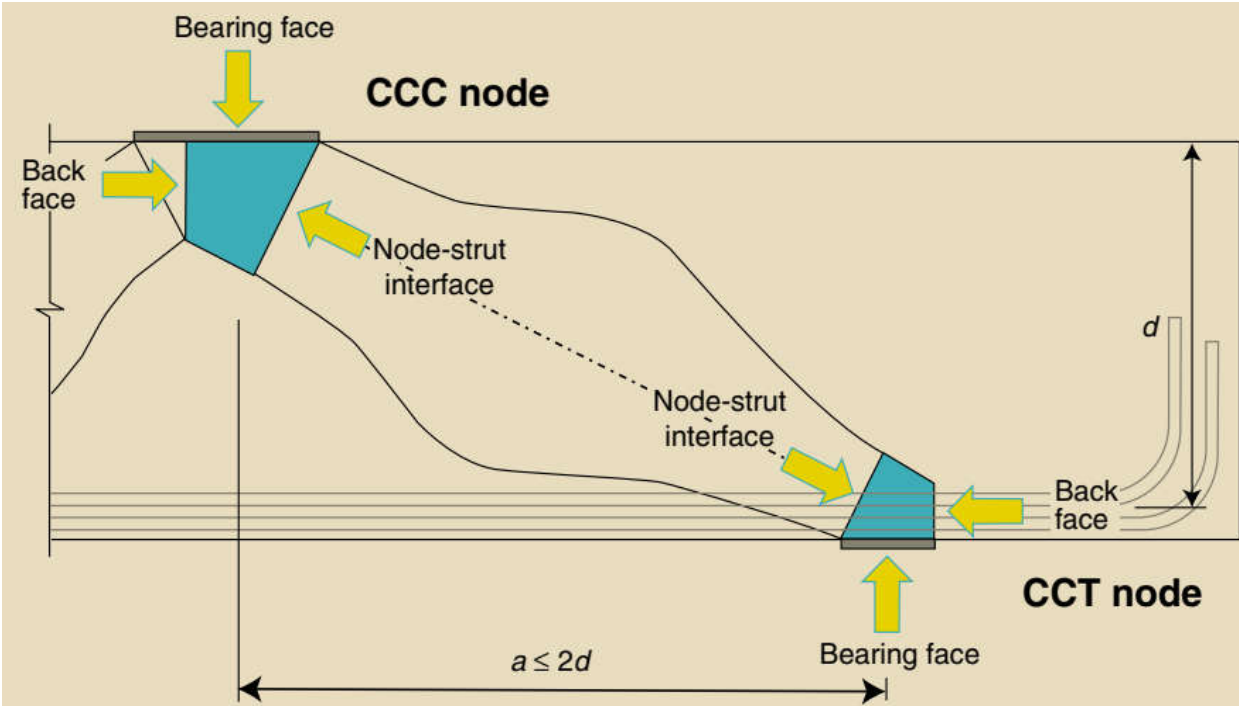
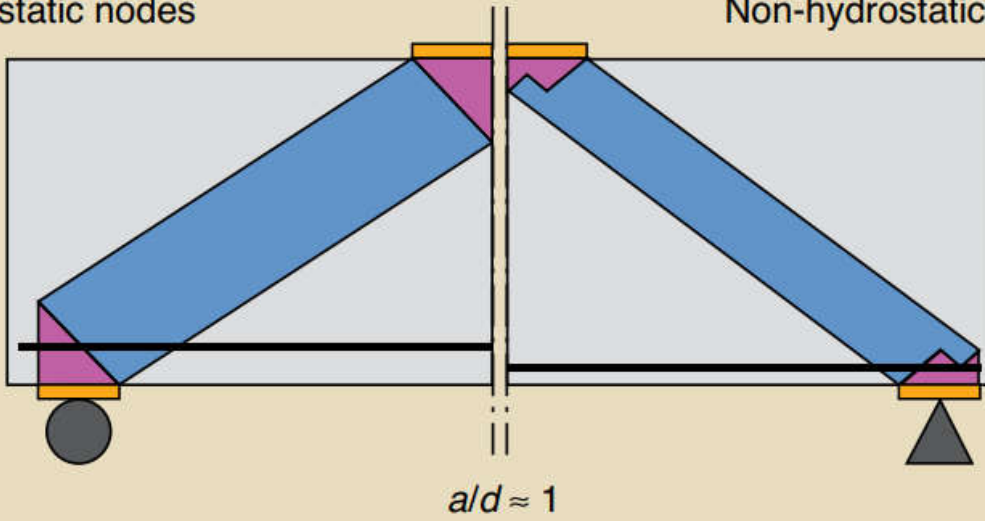


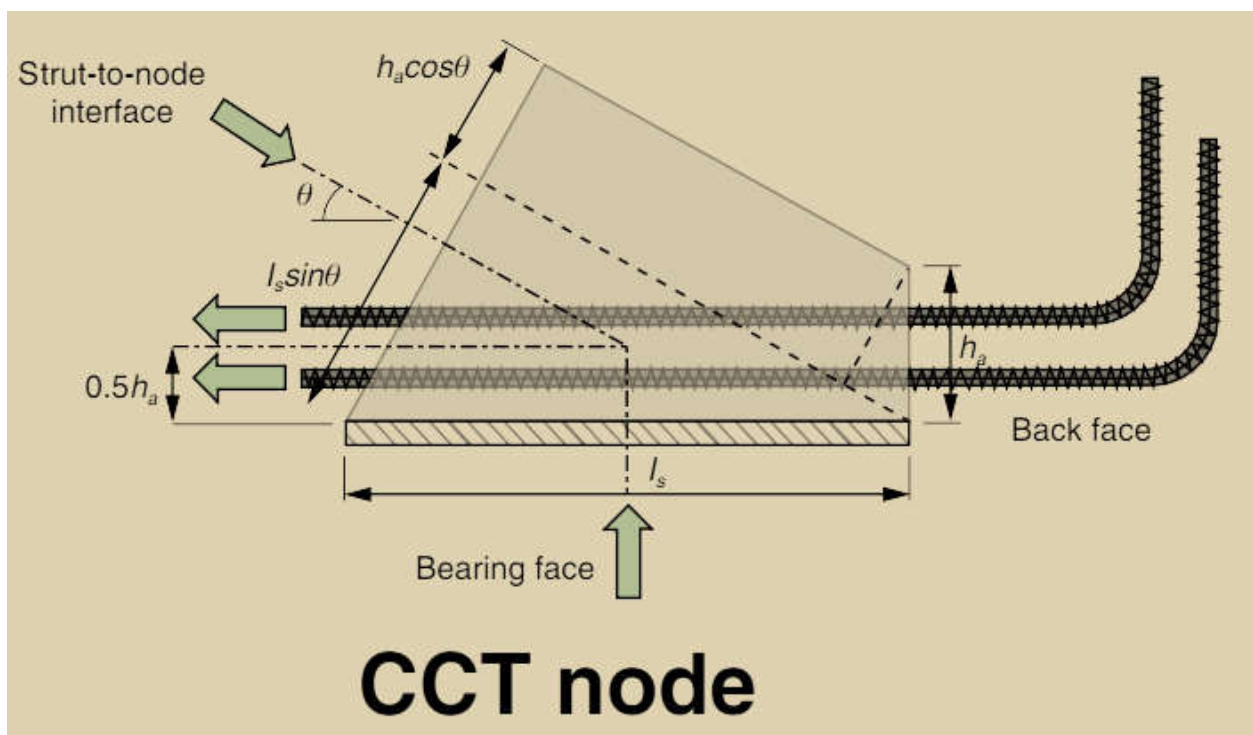
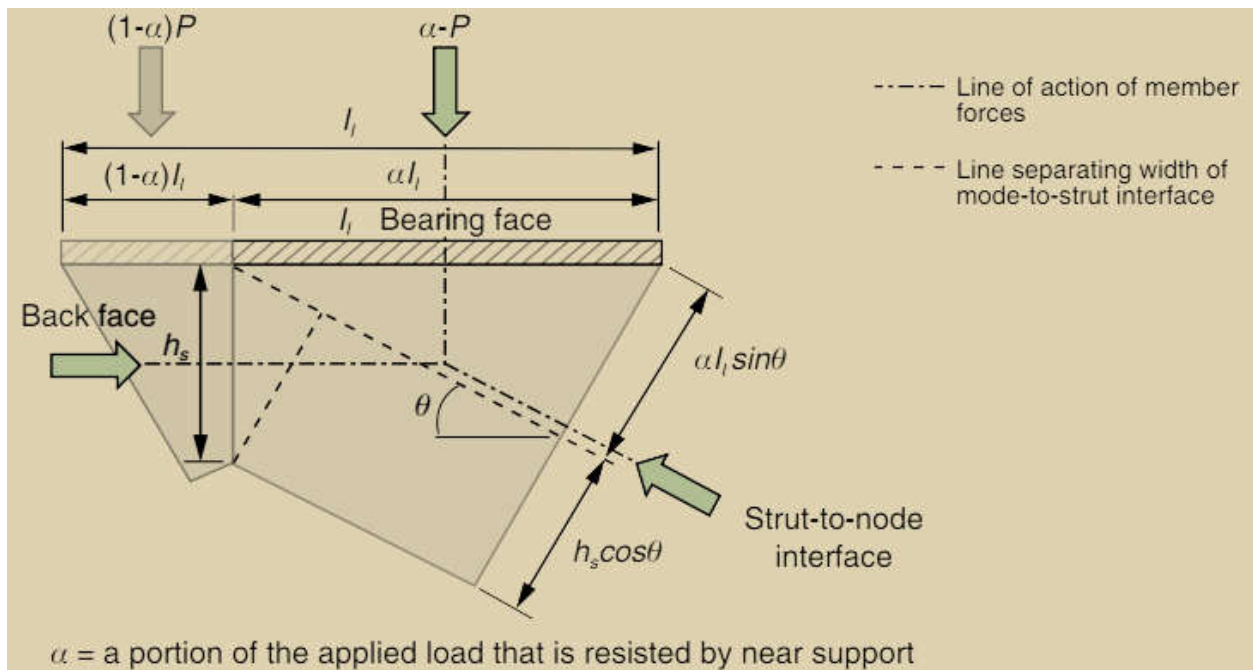
(c) Transverse tensions and compressions.

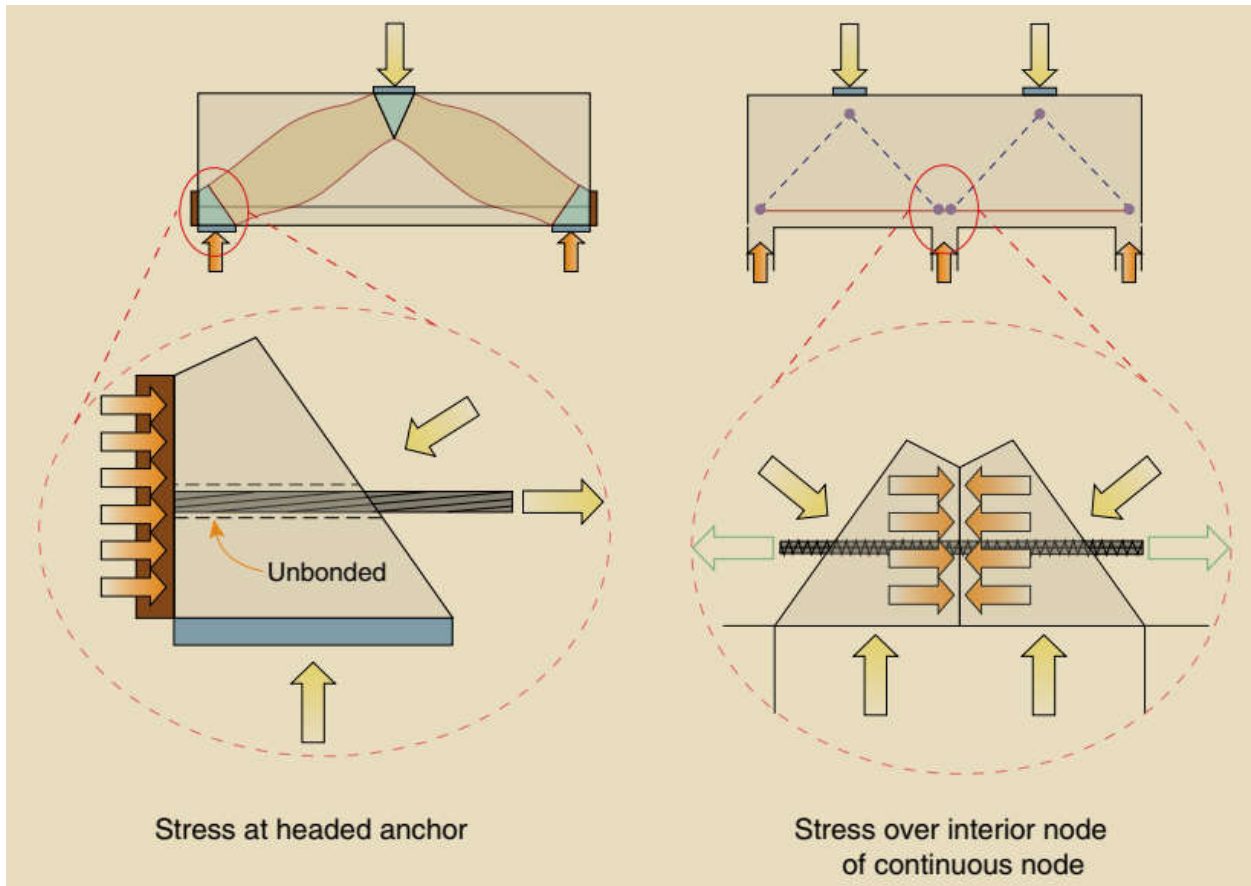
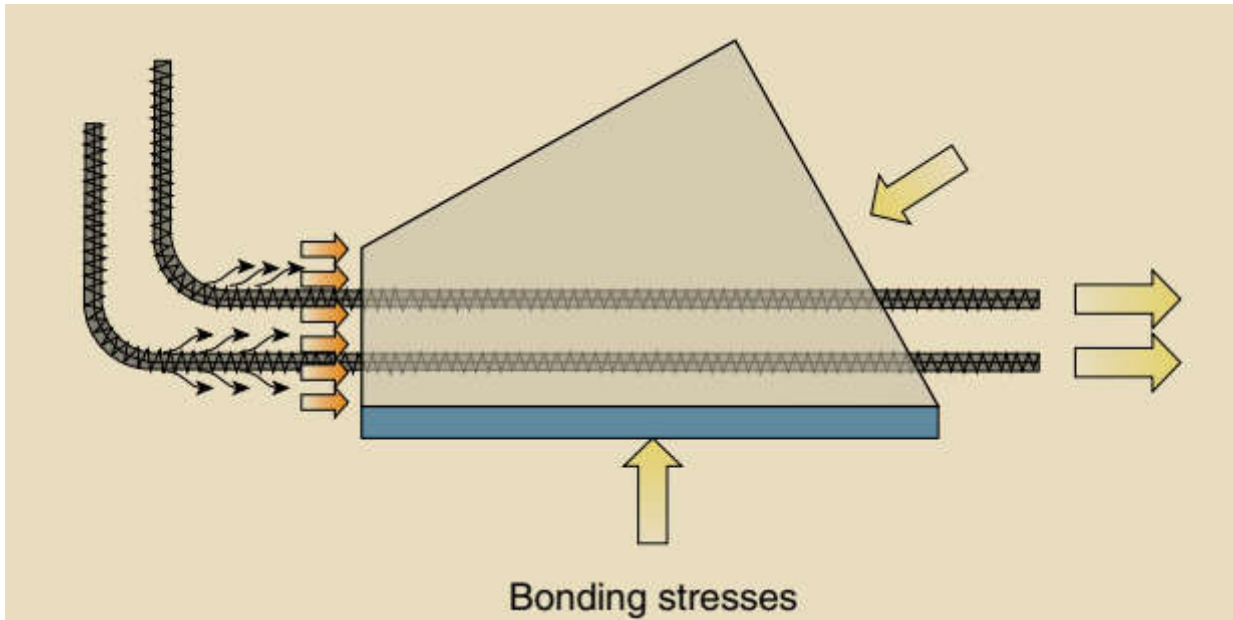


Hydrostatic nodes

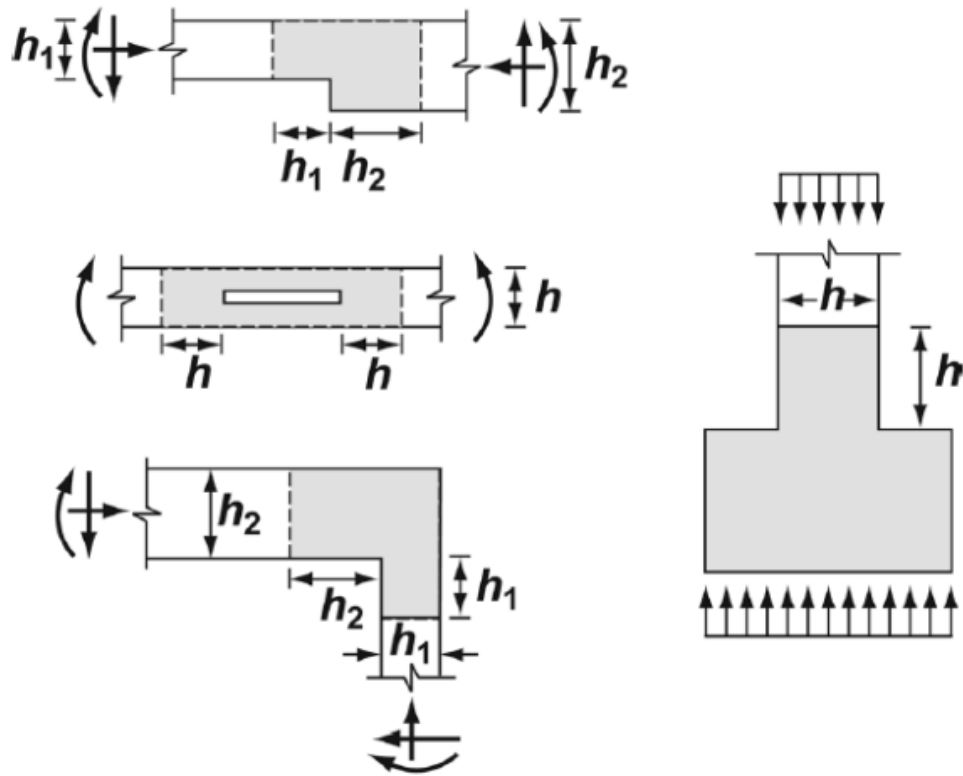
Non-hydrostatic nodes



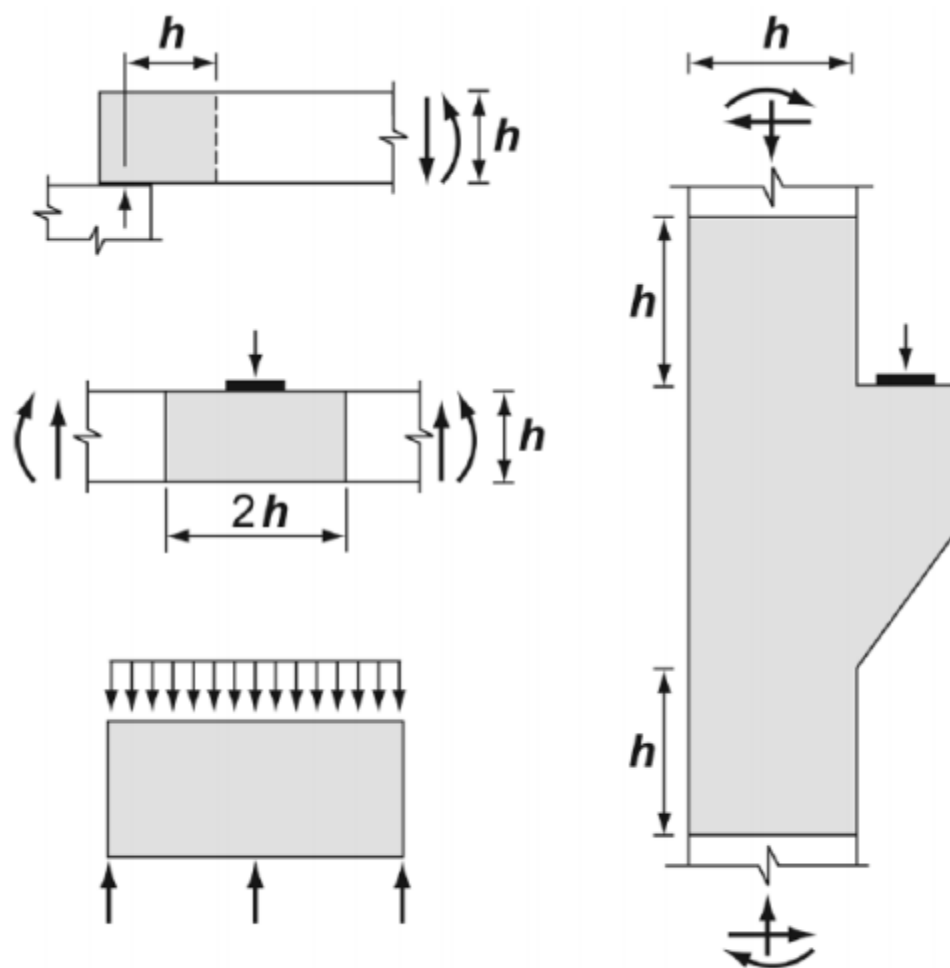




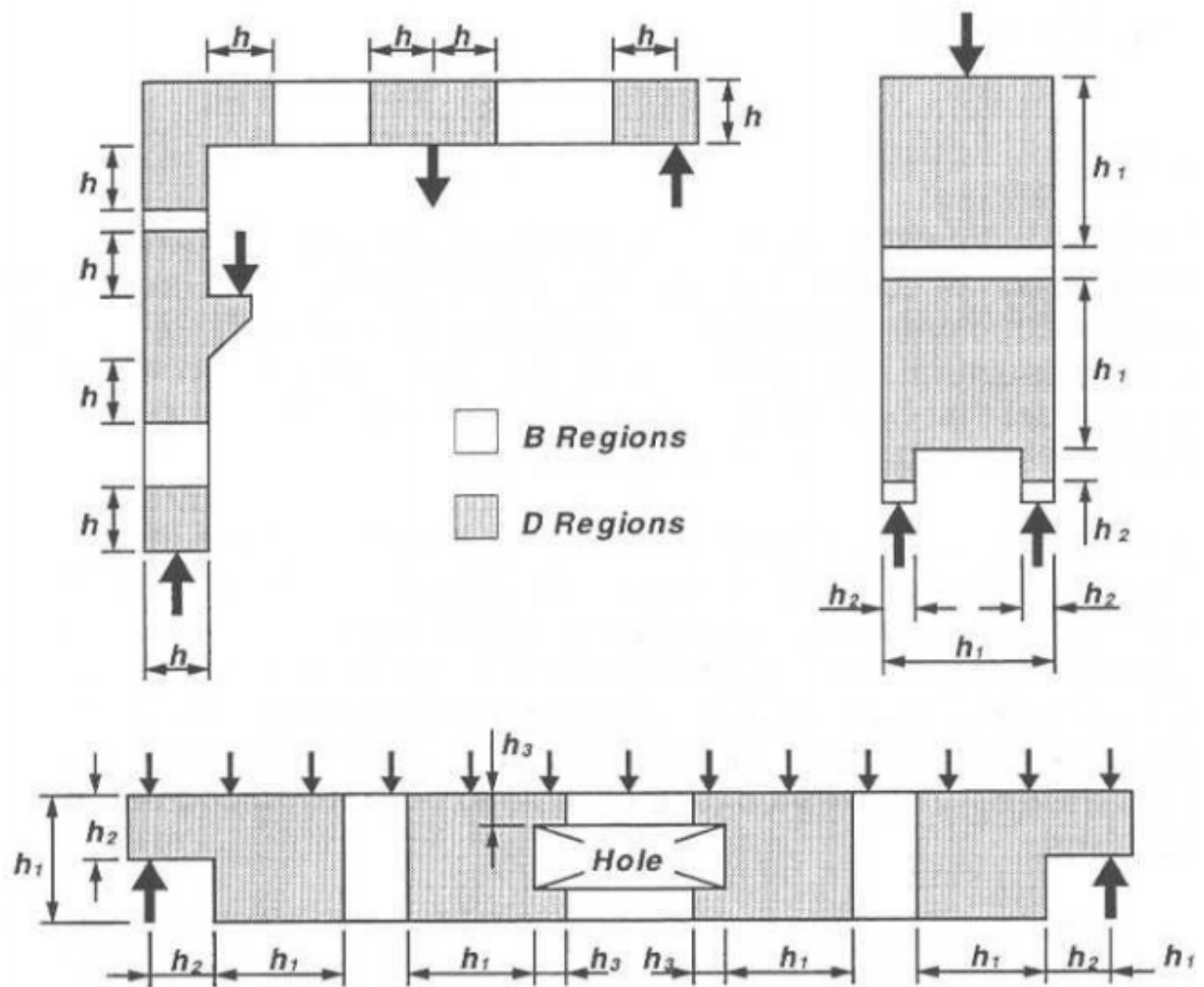
Strut-and-Tie Design



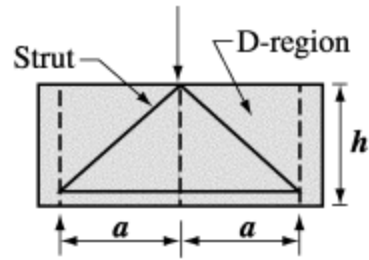
Geometric discontinuities



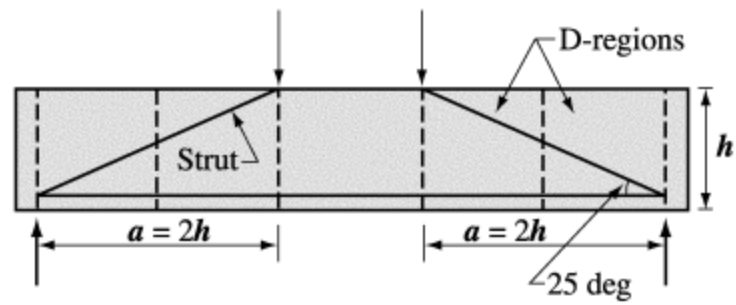
Loading and geometric discontinuities



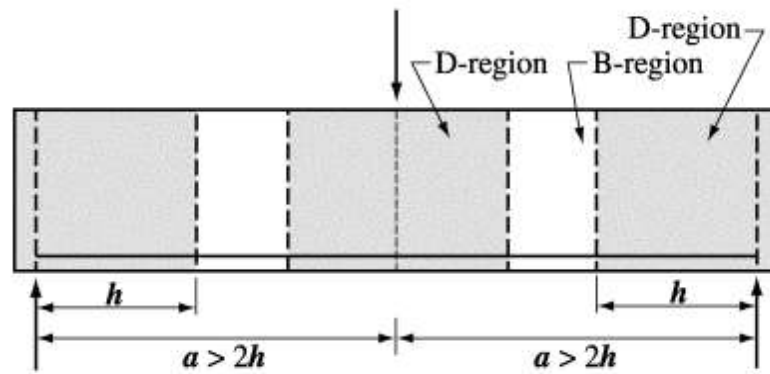
Typical rectangular members



(a) Shear span, $a < 2h$, deep beam

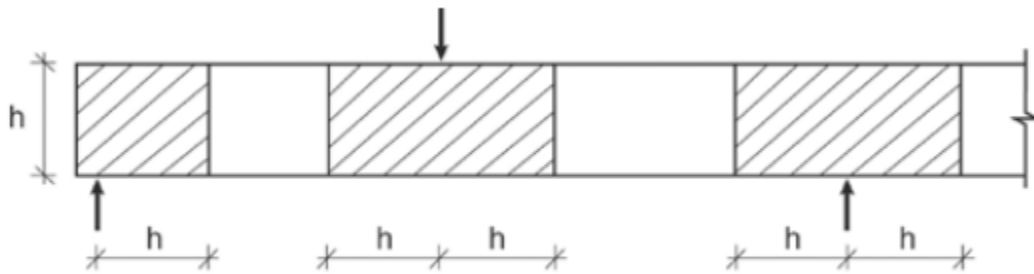


(b) Shear span, $a = 2h$, limit for a deep beam

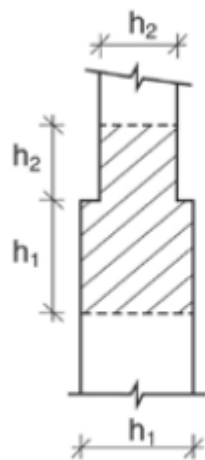


(c) Shear span, $a > 2h$, slender beam

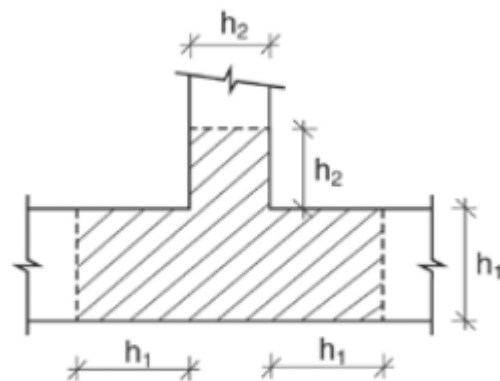
Description of deep and slender beams.



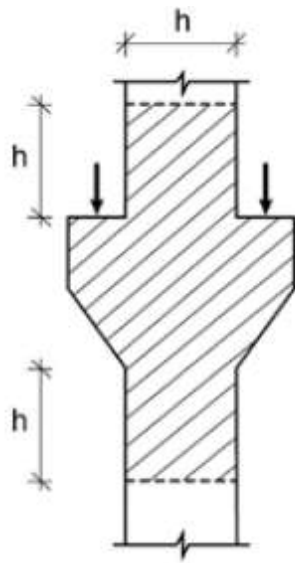
(a) Beam with Concentrated Load



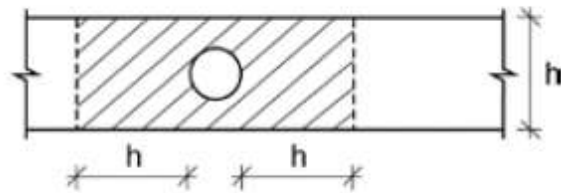
(b) Change in Column or Wall Geometry



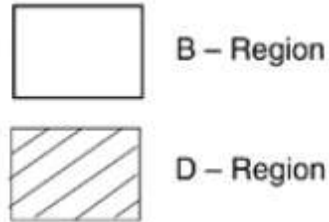
(c) Transfer Girder Supporting a Column



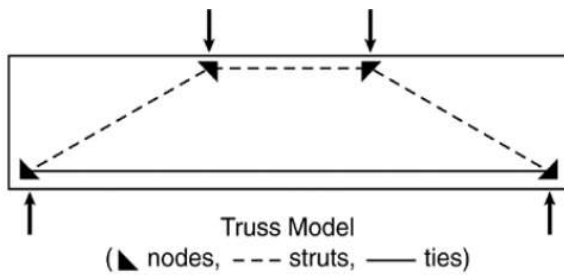
(d) Double Corbel



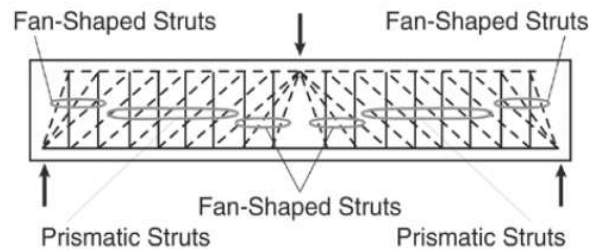
(e) Opening in Beam



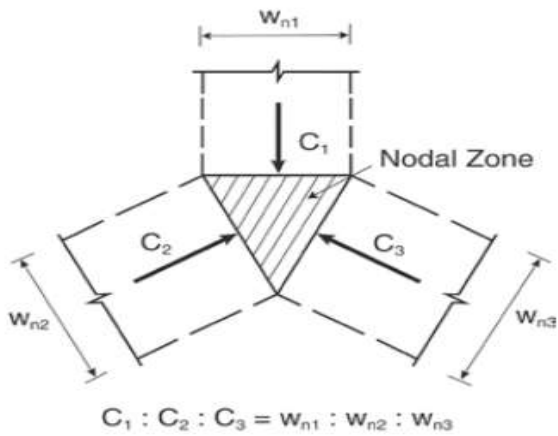
Load and geometric discontinuities



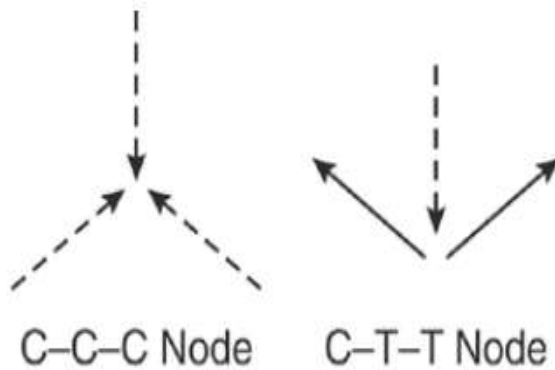
Strut-and-tie model



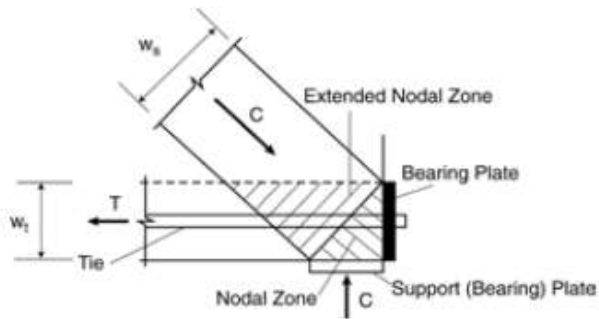
Prismatic and fan-shaped struts



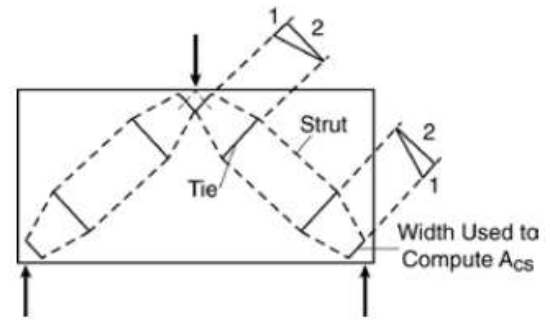
Hydrostatic nodal zone



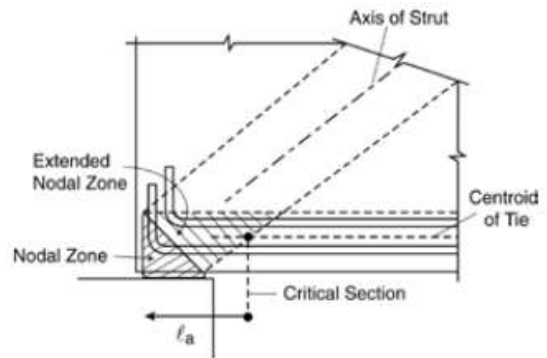
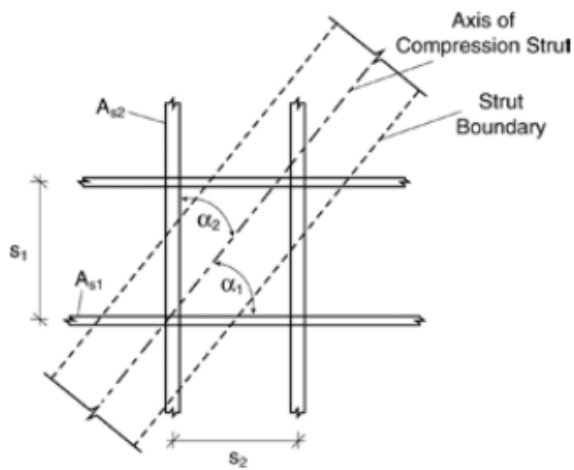
Classification of nodes



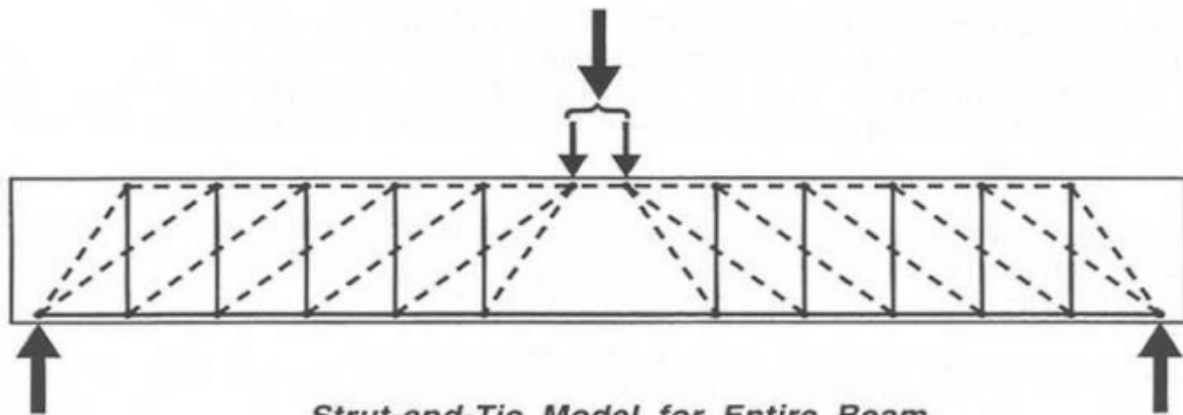
Extended nodal zone



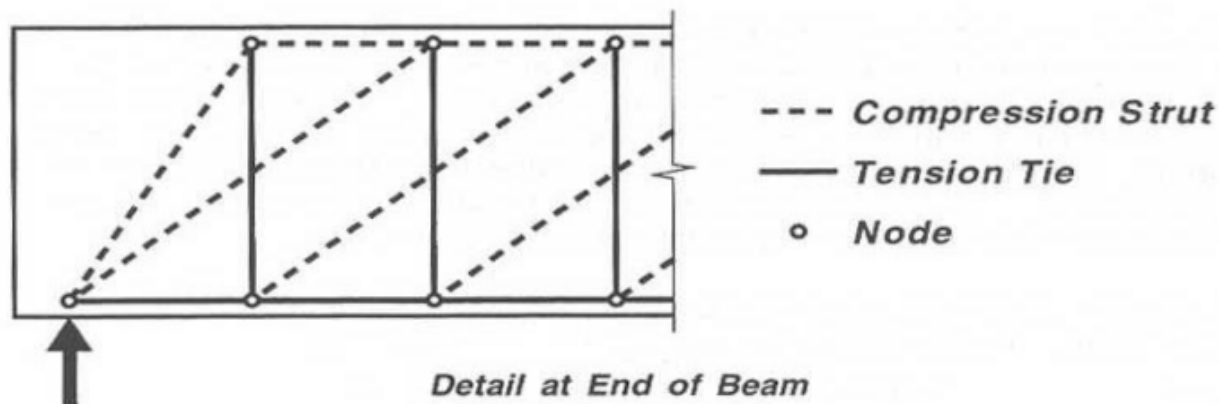
Bottle-shaped compression strut



Anchorage of tie reinforcement



Strut-and-Tie Model for Entire Beam



مراحل طراحی با مدل خربایی

خلاصه مراحل طراحی با مدل خربایی بصورت زیر است:

۱. نواحی D در سازه تعیین شده و با رسم دیاگرام جسم آزاد برای ناحیه مورد نظر، نیروها و یا تنشهای

مرزی تعیین می شود. البته در بعضی موارد مثل تیرهای عمیق یا ستونهای خیلی کوتاه، کل سازه را

می توان بصورت خربایی مدل کرد.

۲. نیروهای مرزی بصورت تعداد محدودی نیروی متمرکز که بتوان با یک سیستم خربایی انتقال داد،

تبدیل می شود.

۳. مدل خربایی مناسب جهت انتقال نیروها تعیین می شود.

۴. بر اساس تحلیل اولیه و محاسبه تقریبی ابعاد اعضای خرپا هندسه مدل نهایی می شود.

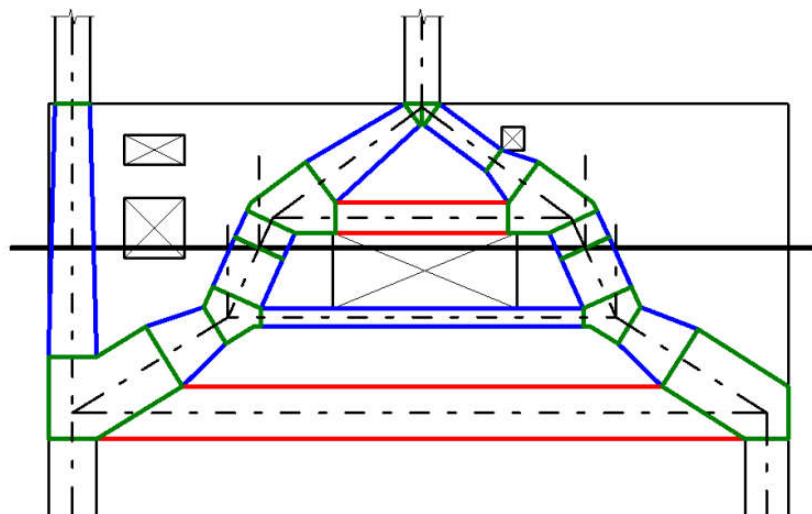
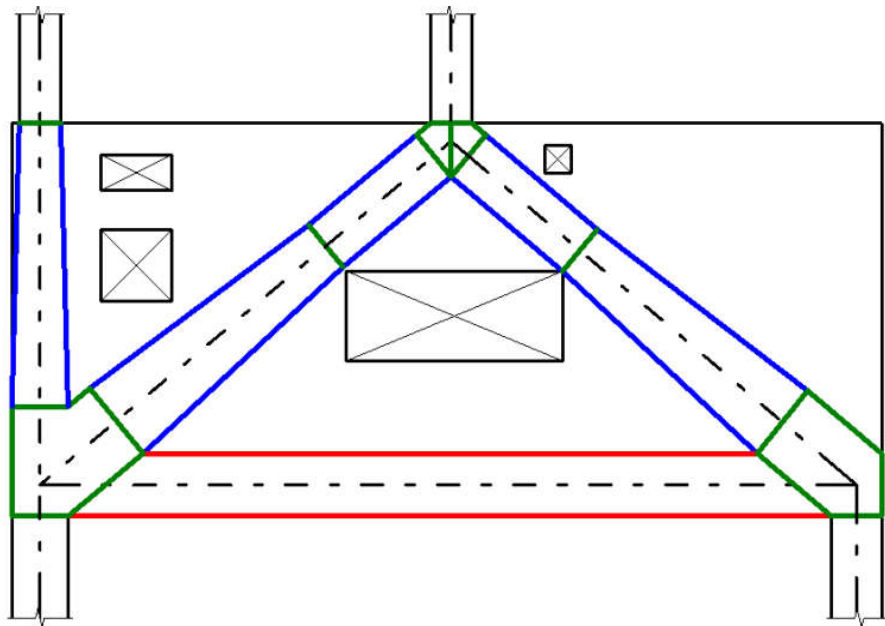
۵. خرپا تحلیل شده و نیروهای داخلی تعیین می گردد.

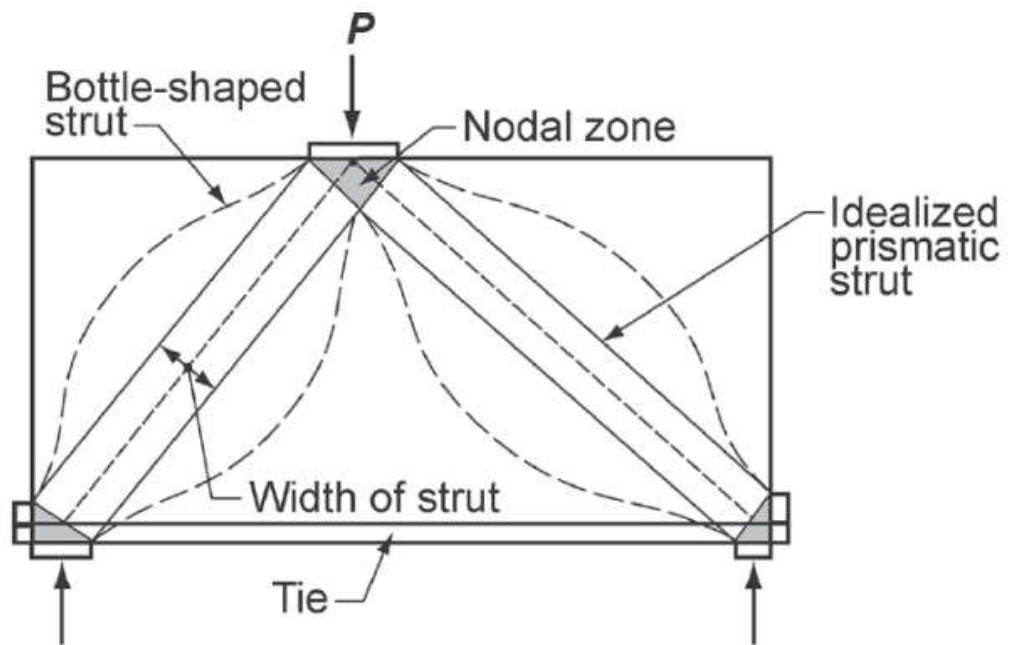
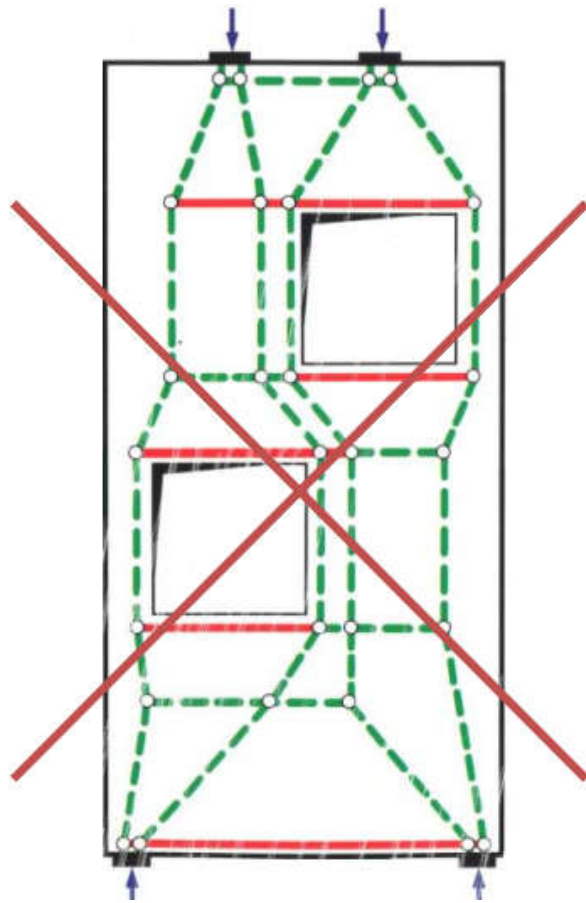
۶. مقاومت فشاری اعضای فشاری و نواحی گرهی بر اساس رابطه طراحی کنترل می شود.

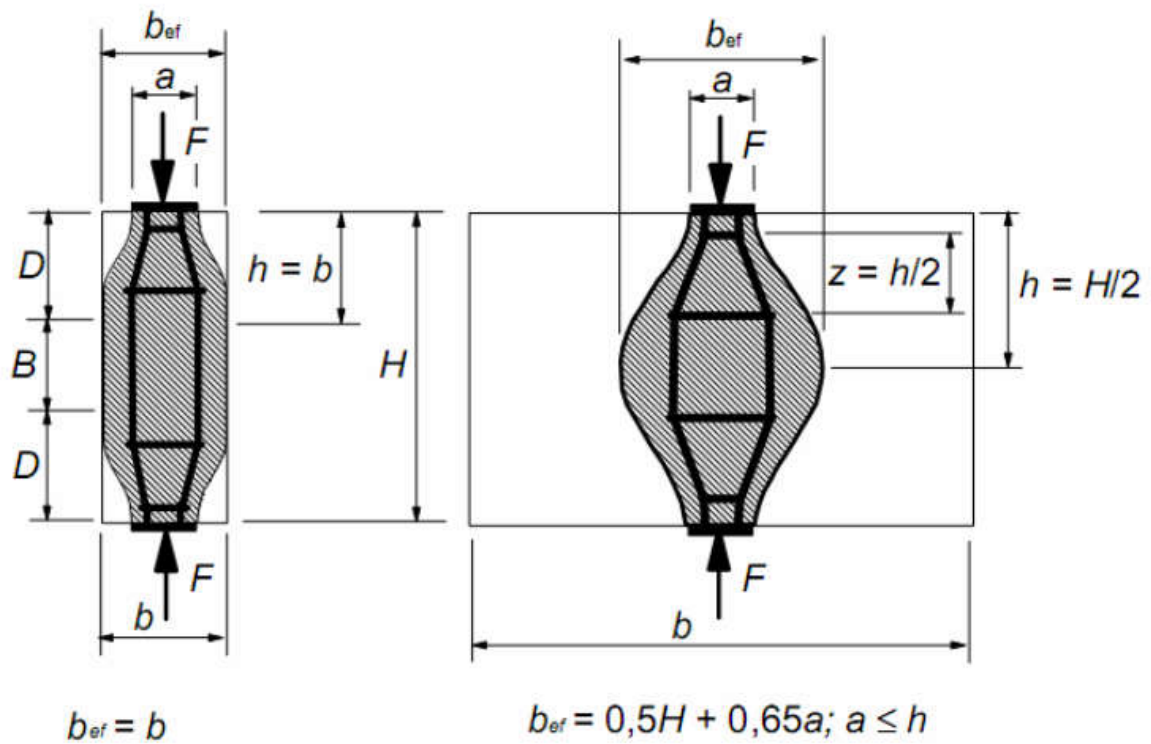
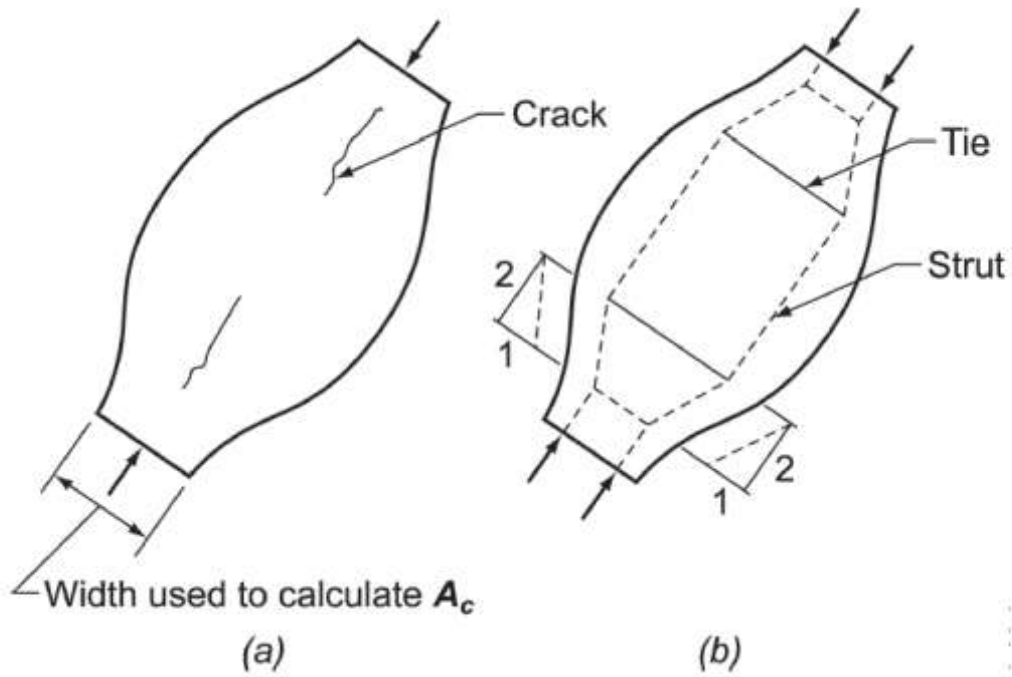
۷. برای اعضای کششی آرماتور مناسب طراحی می شود.

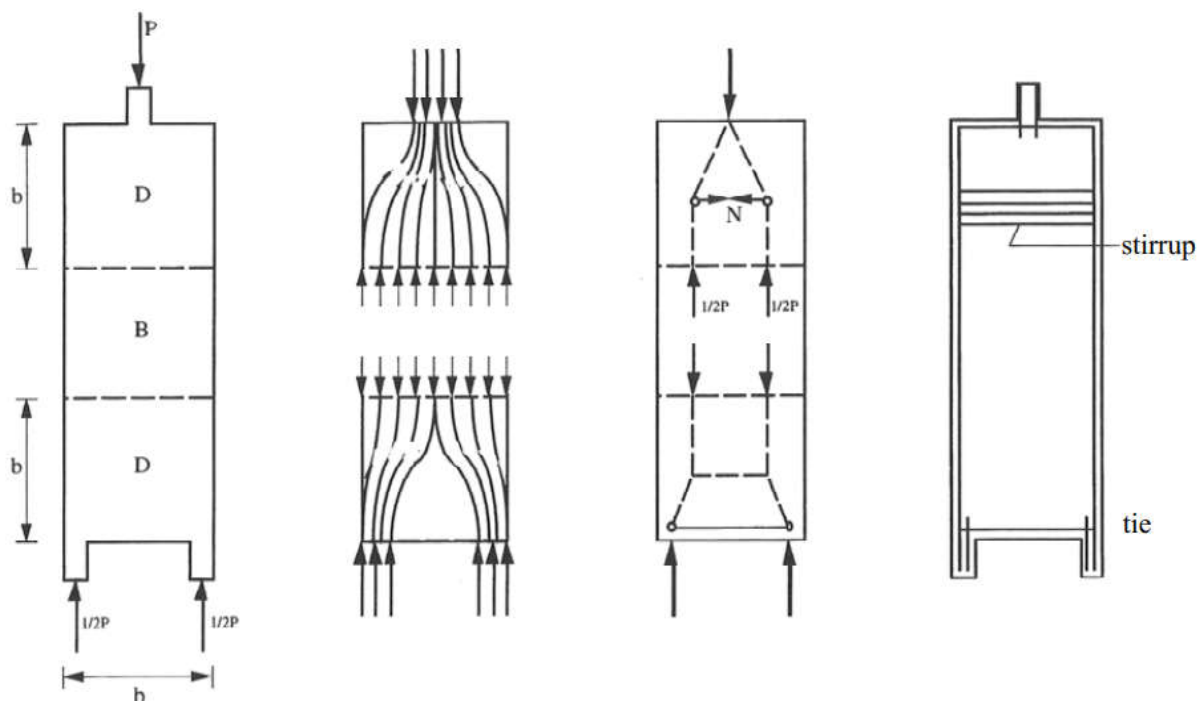
۸. آرماتورهای حداقل کنترل شده و جزئیات آرماتوربندی با توجه به طولهای مهار می لازم تعیین می

شود.









مدل خرابایی حاصله ممکن است دارای یکی از مدهای خرابی زیر باشد:

۱. خرد شدگی اعضای فشاری
۲. تسلیم و یا شکست مهاری اعضای کششی
۳. انهدام نقاط گرهی

معیارهای انتخاب مدل خرابایی

آیین نامه ACI ملزومات زیر را برای تعیین مدل خرابایی مقرر می دارد:

۱. مدل خرابایی باید در برابر بارهای وارده و عکس العملهای تکیه گاهی دارای تعادل باشد. (شرط

تعادل)

۲. ظرفیت مقاوم اعضای خرپا و مناطق گرهی از نیروهای ایجاد شده در مدل تحت بارهای نهایی کمتر

نباشد. (شرط سیلان)

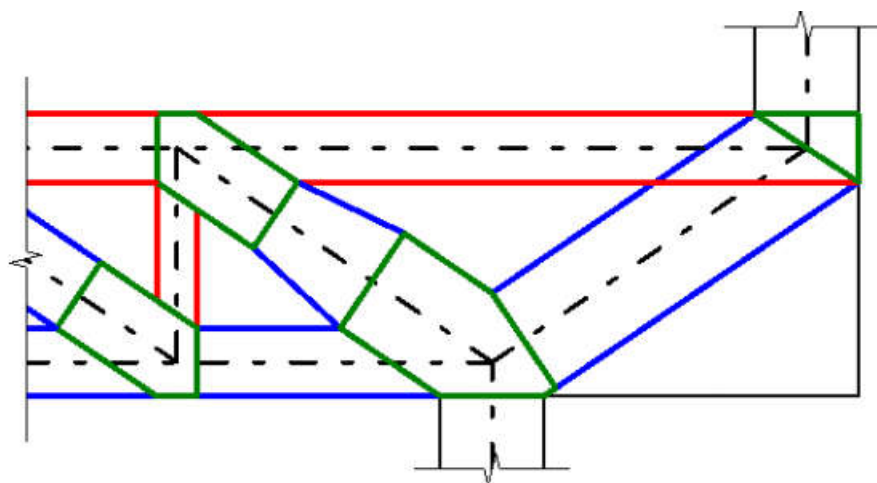
۳. در تعیین جزئیات هندسی خرپا، باید ابعاد اعضای خرپا و نواحی گرهی در نظر گرفته شود.

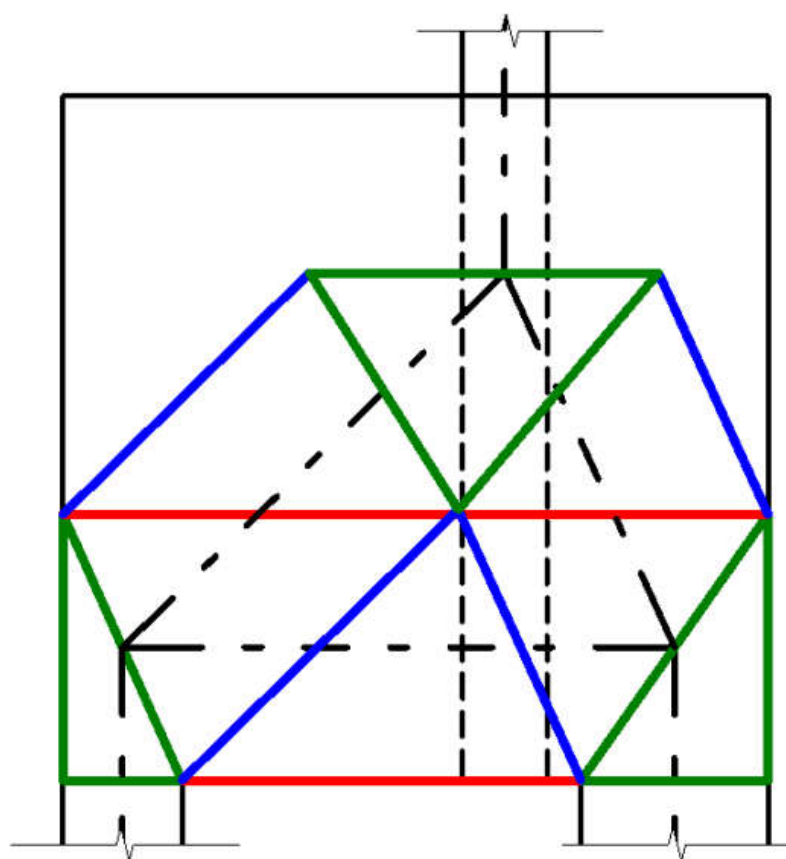
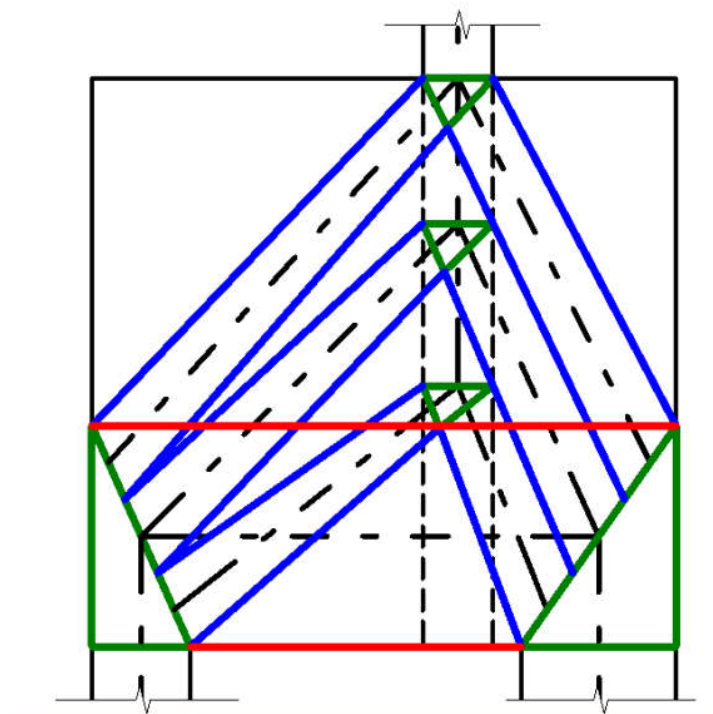
۴. اعضای کششی می توانند اعضای فشاری را قطع کرده و از آنها عبور کنند ولی اعضای فشاری تنها

می توانند در مناطق گرهی به هم برسند یا با یکدیگر همپوشانی داشته باشند.

۵. زاویه بین محور هر عضو فشاری و هر عضو کششی در محل یک گره مشترک نباید از ۲۵ درجه

کمتر باشد.





Feasible Inclined Angle θ

Swiss Code: $0.5 \leq \cot \theta \leq 2.0$ ($\theta=26^\circ$ to 64°)

European Code: $3/5 \leq \cot \theta \leq 5/3$ ($\theta=31^\circ$ to 59°)

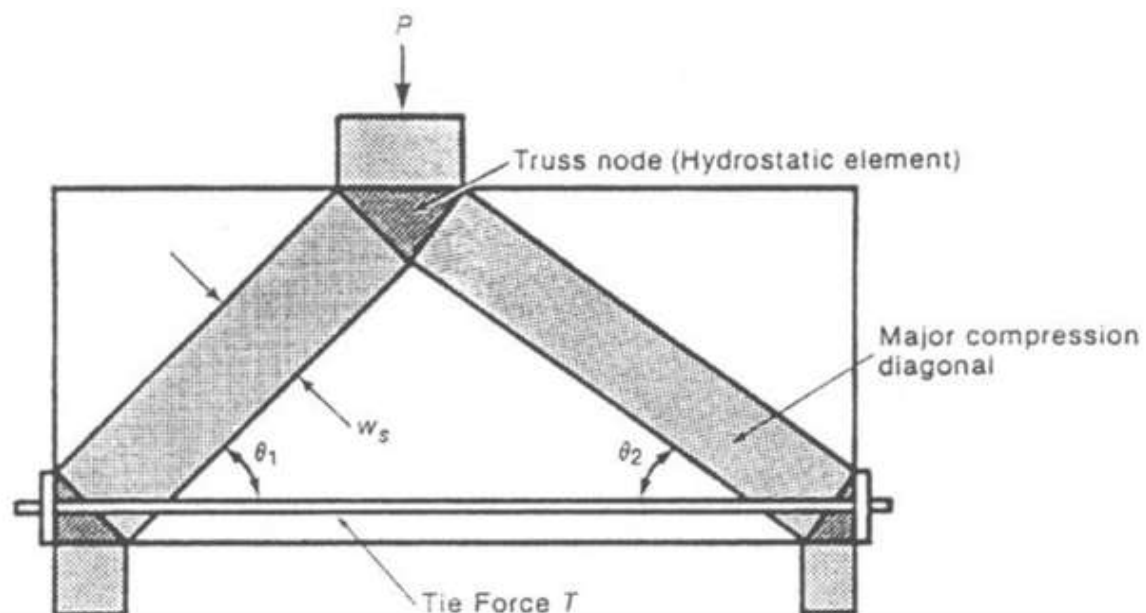
Collin's & Mitchells

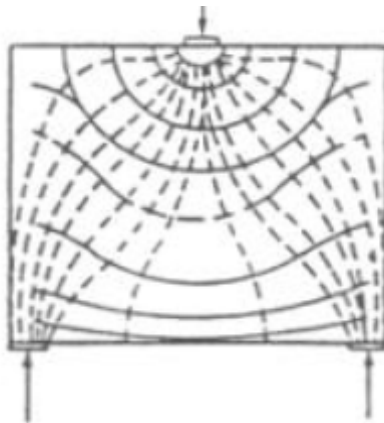
$$\theta_{\min} = 10 + 110(V_u/[\phi f_c' b_w j d]) \text{ deg}$$

$$\theta_{\max} = 90 - \theta_{\min} \text{ deg}$$

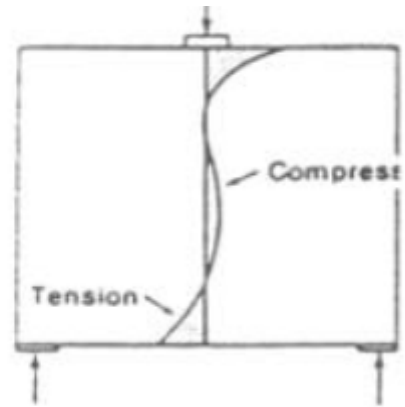
ACI 2002: $\theta_{\min} = 25^\circ$; ($25^\circ \leq \theta_{\text{recom}} \leq 65^\circ$ here)

STM of a Deep Beam

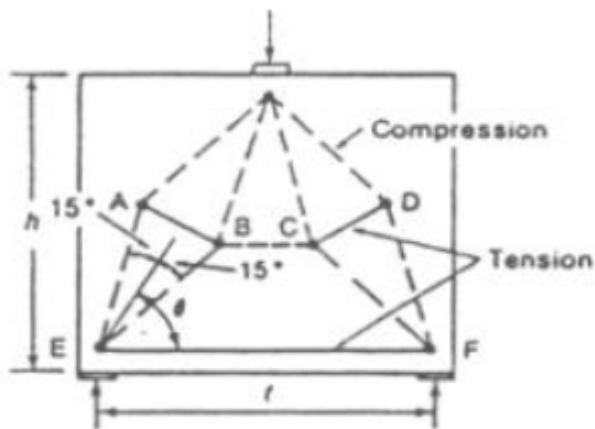




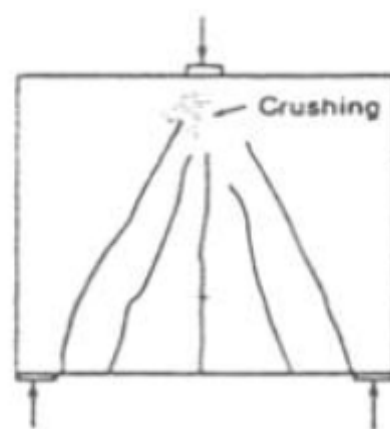
(a) Stress trajectories.



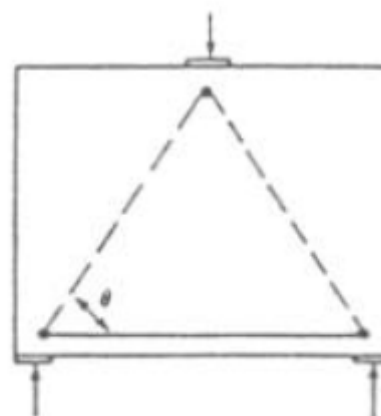
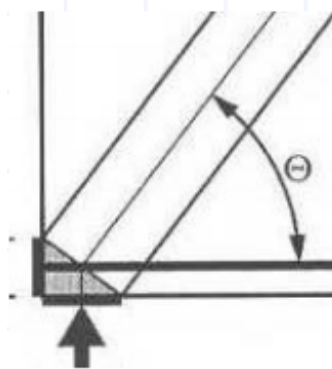
(b) Distribution of theoretical horizontal elastic stresses at n



(c) Truss model.
 $\theta = 68^\circ$ if $l/h < 0.8$
 $= 37^\circ$ if $l/h = 2.0$



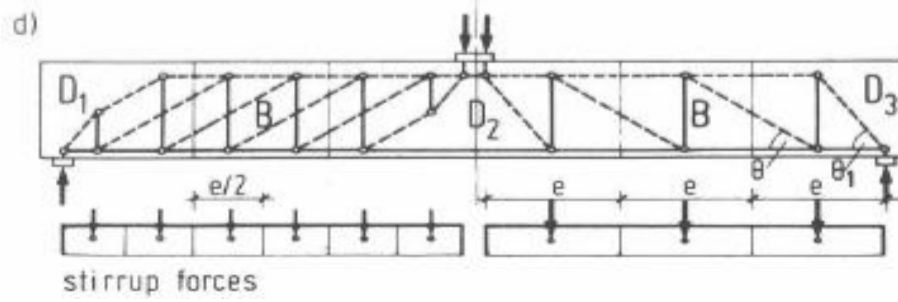
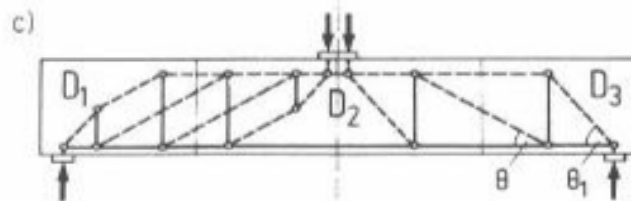
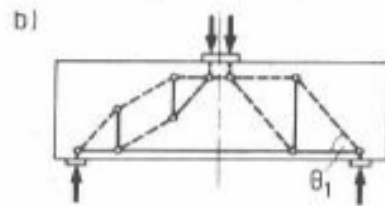
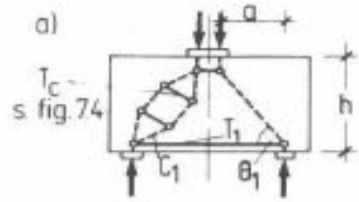
(d) Crack pattern in test.

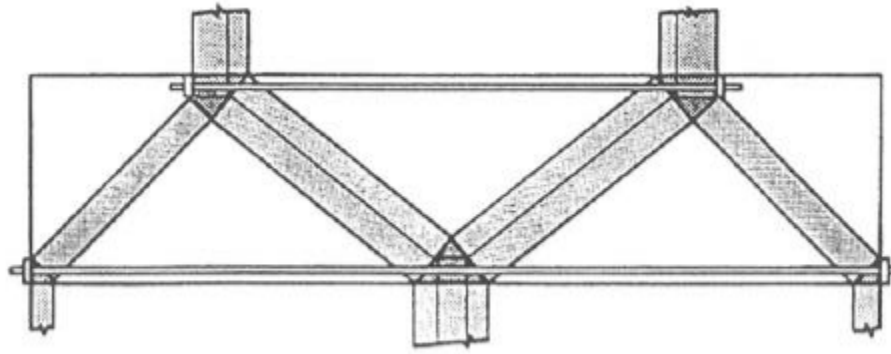


(e) Simplified truss.

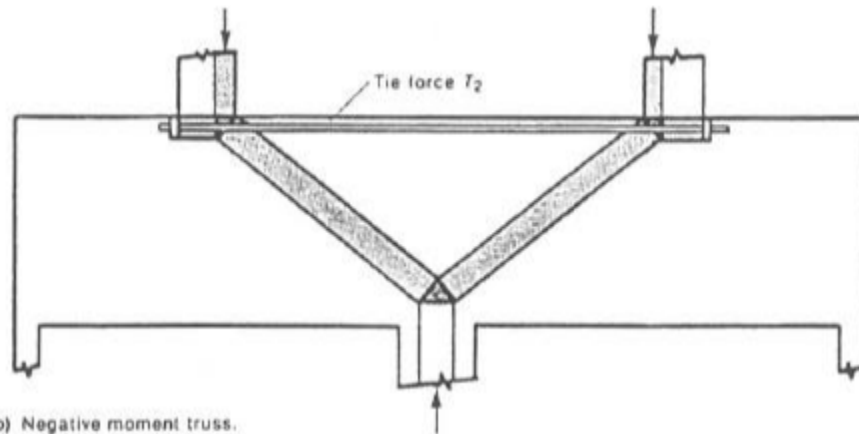
model

refined simplified

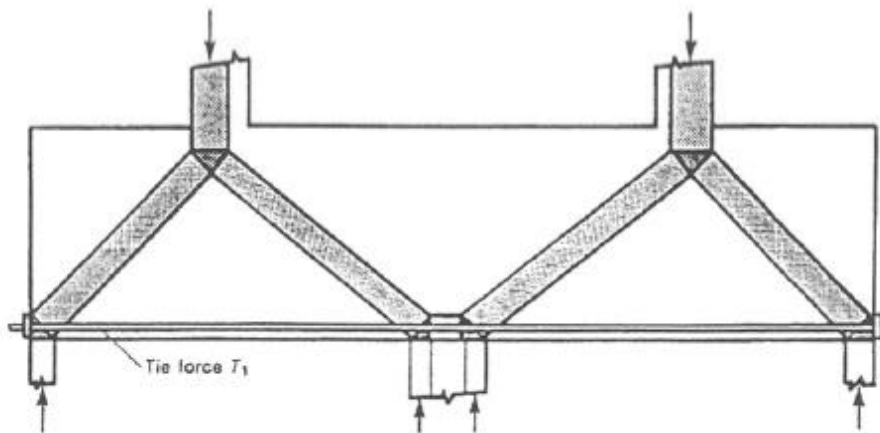




(a) Complete plastic truss.



(b) Negative moment truss.

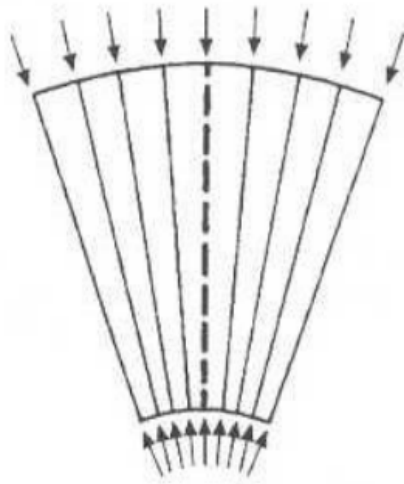


(c) Positive moment truss.

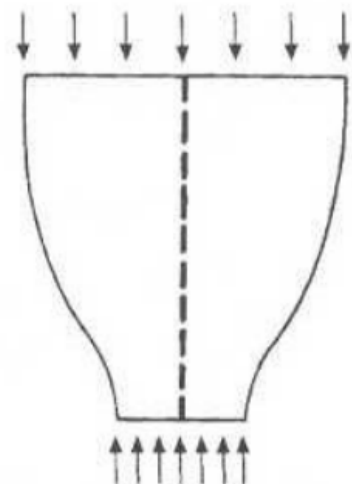
Strut	Compression Member	Concrete
Tie or Stirrup	Tension Member	Reinforcement
Node	Connection	Concrete



a) Prism

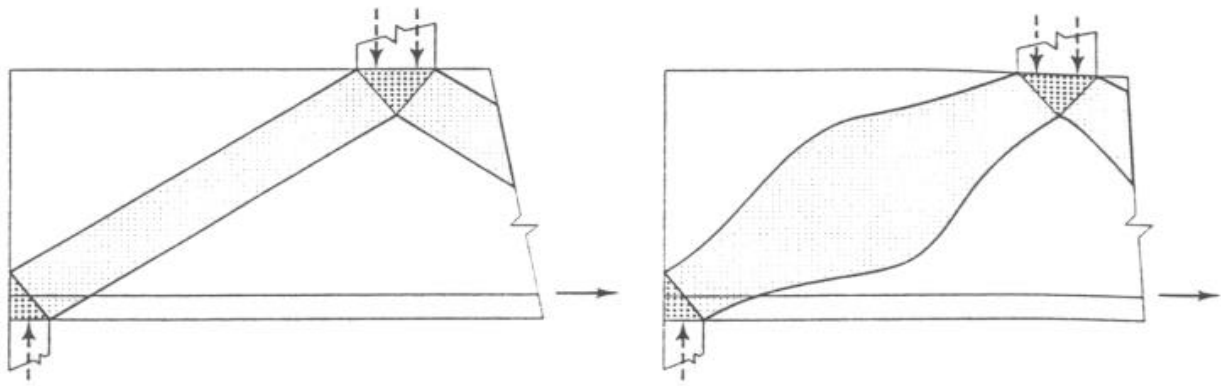


b) Fan



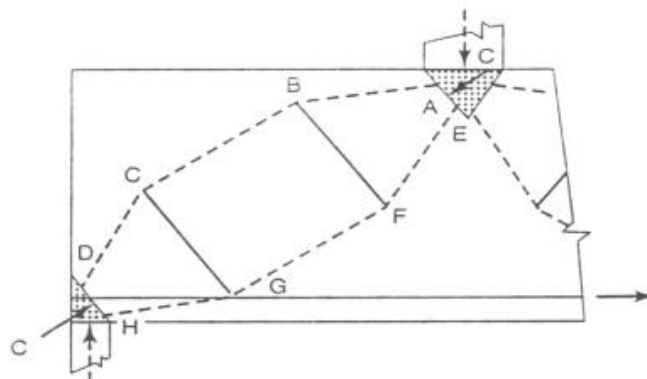
c) Bottle

Three Types of Struts (Adapted from Schlaich et al 1987)

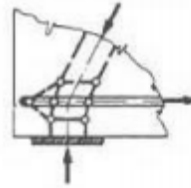
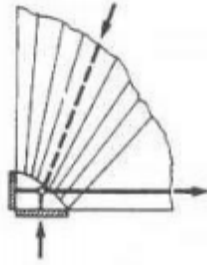


(a)

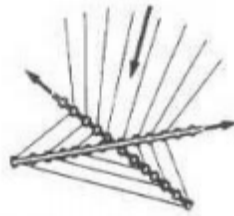
(b)



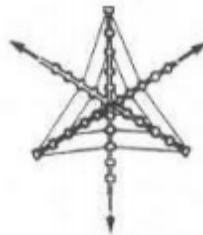
b) CCT Nodes



c) CTT Nodes

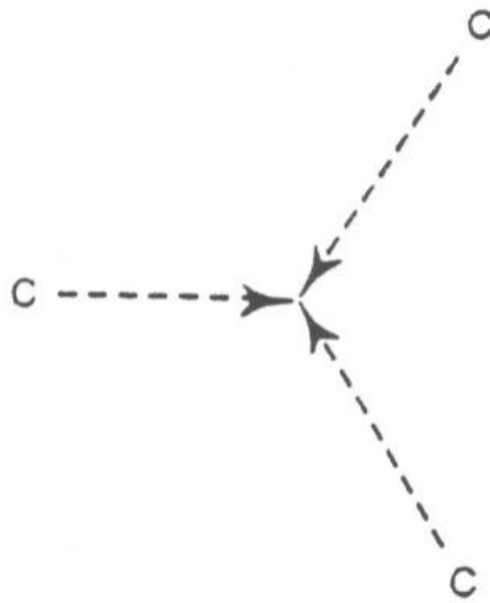


d) TTT Nodes

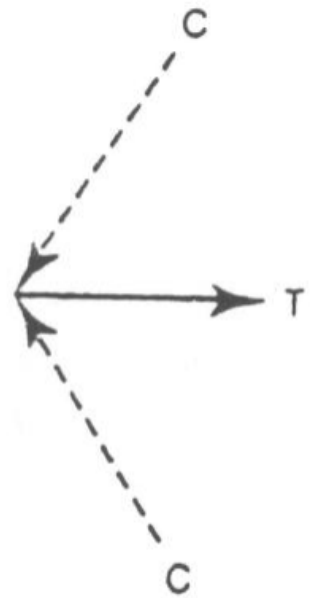




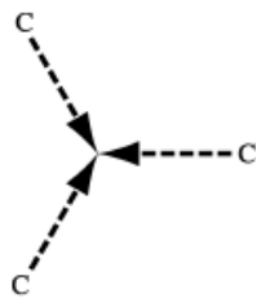
(a)



(b)



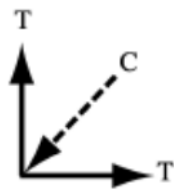
(c)



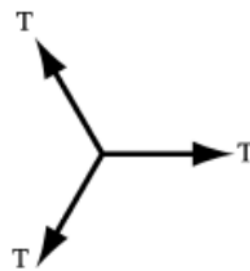
(a) C-C-C Node



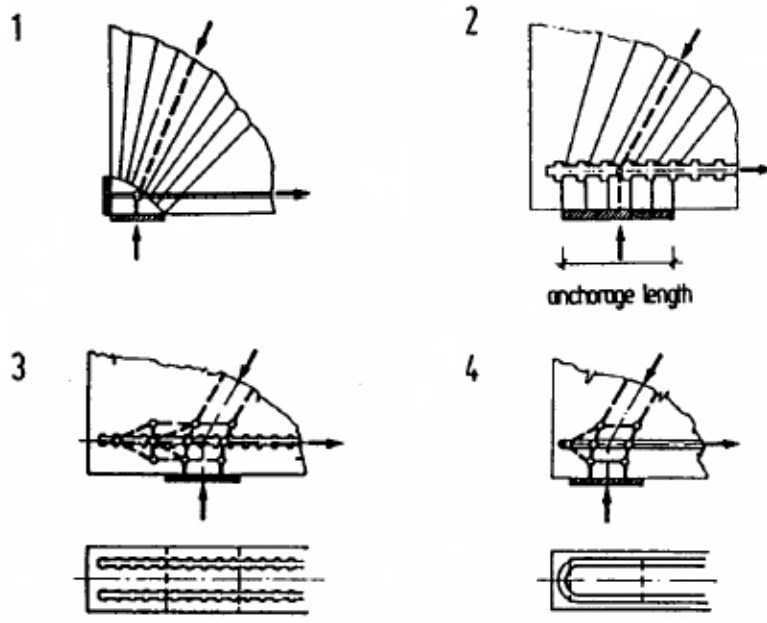
(b) C-C-T Node



(c) C-T-T Node



(d) T-T-T Node

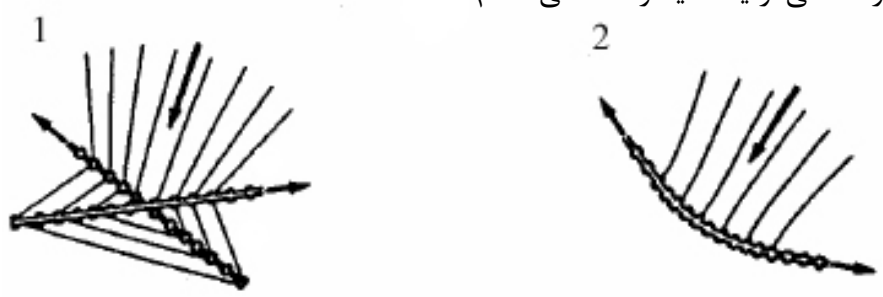


گره CCT

گره CTT شامل Strut نگه داشته شده است با

1. دو میلگرد چسبیده

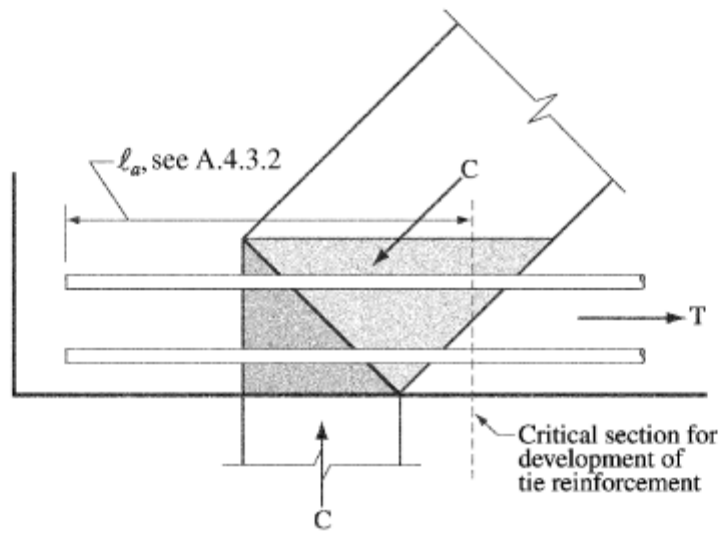
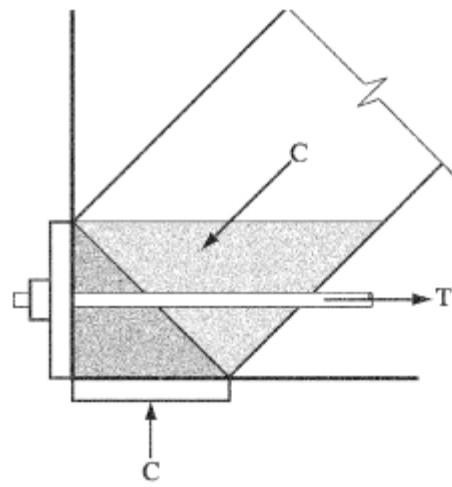
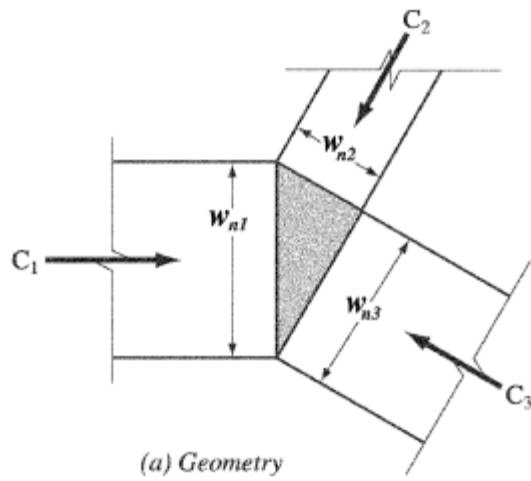
2. فشار شعاعی از یک میلگرد شعاعی خم شده

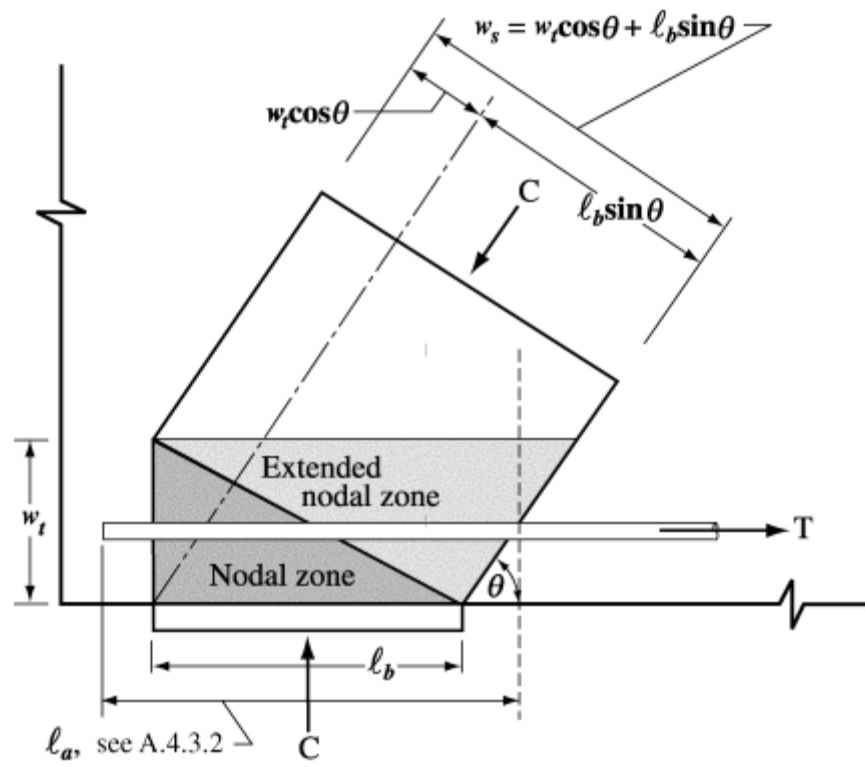


گره CTT

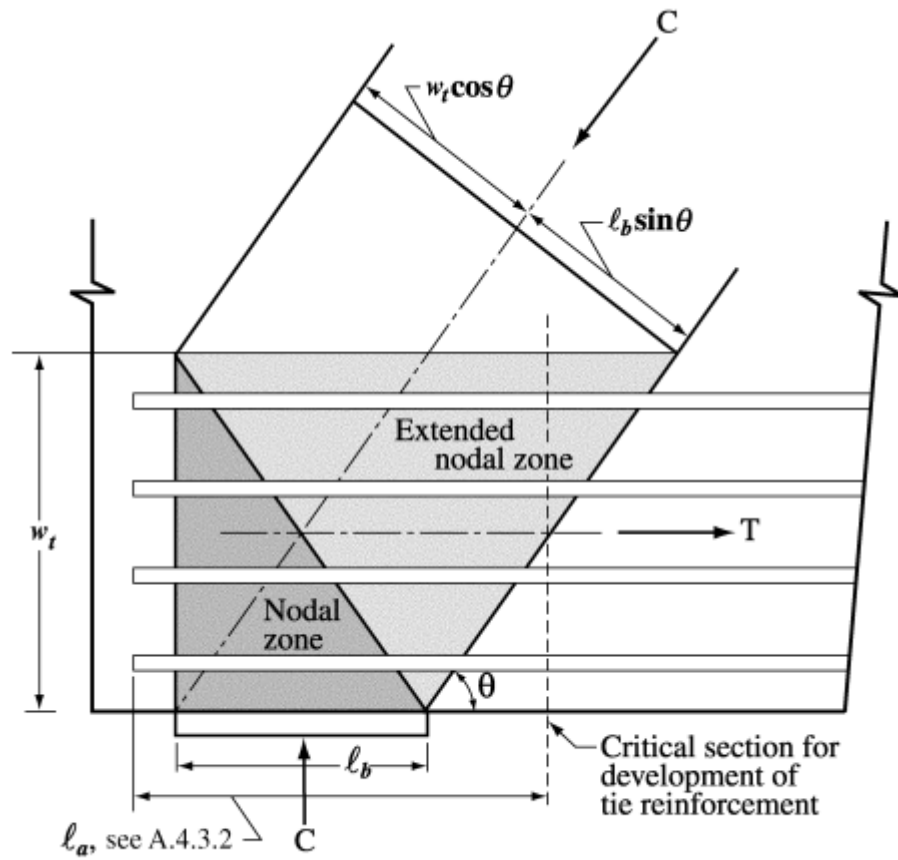
گره TTT به جای Strut فشاری یک Tie کششی قرار گرفته است.







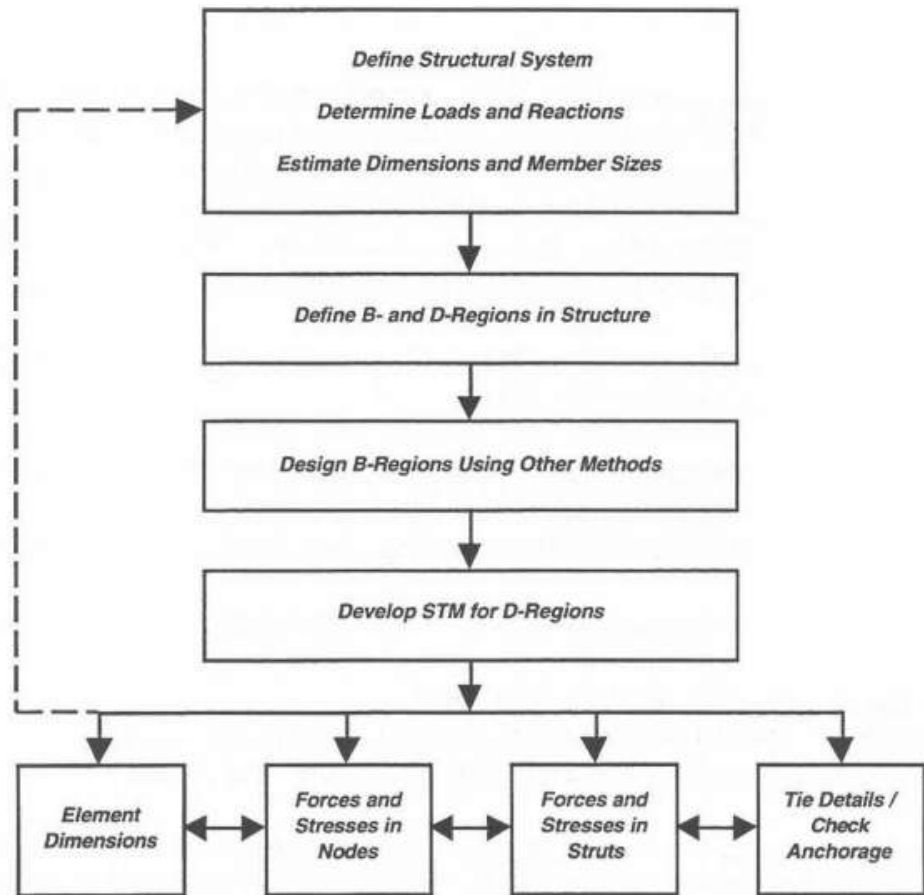
(a) One layer of steel



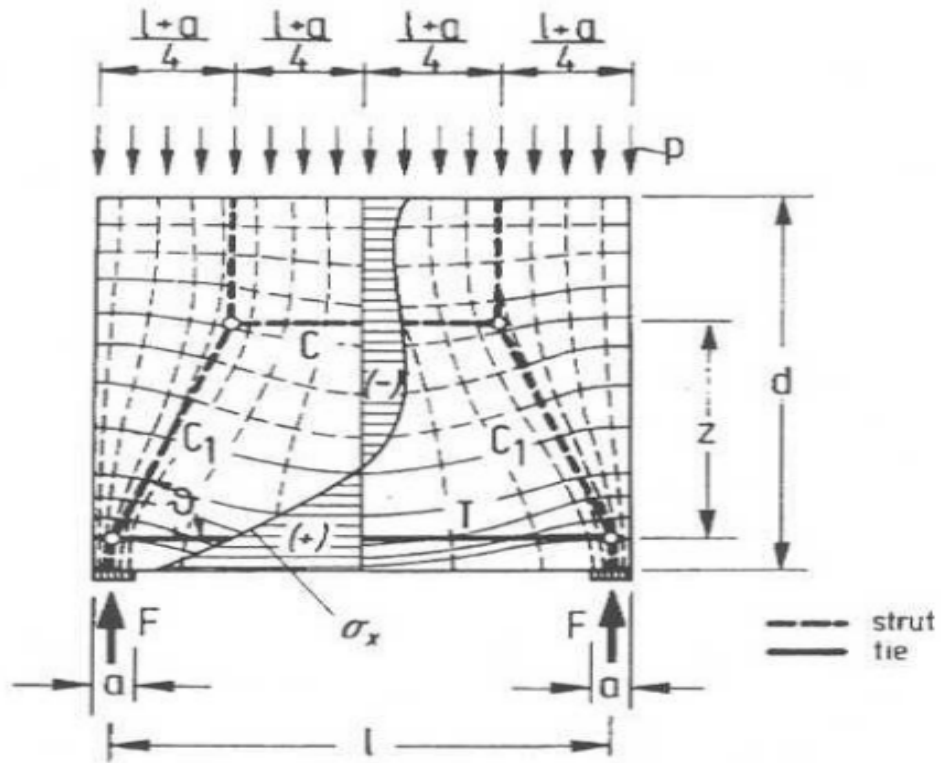
(b) Distributed steel

	Singular Nodes	Smeared Nodes	
Uniform Load on a Deep Beam			
Uniform Load on a Deep Beam with Single Central Support			
Opposing Concentrated Loads on a Deep Member		(without reinforcement) 	

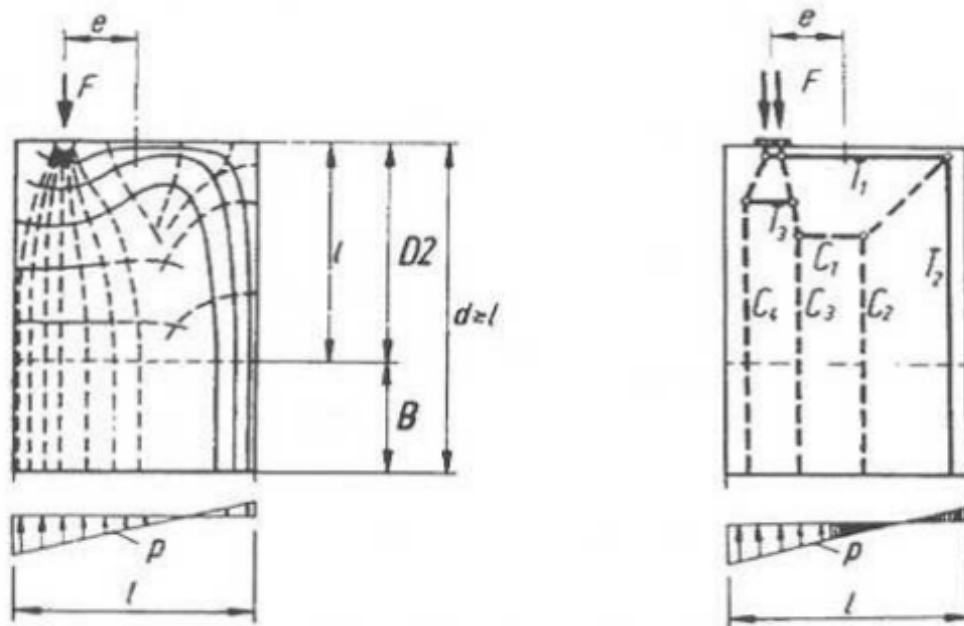
STM Model Design Flow Chart



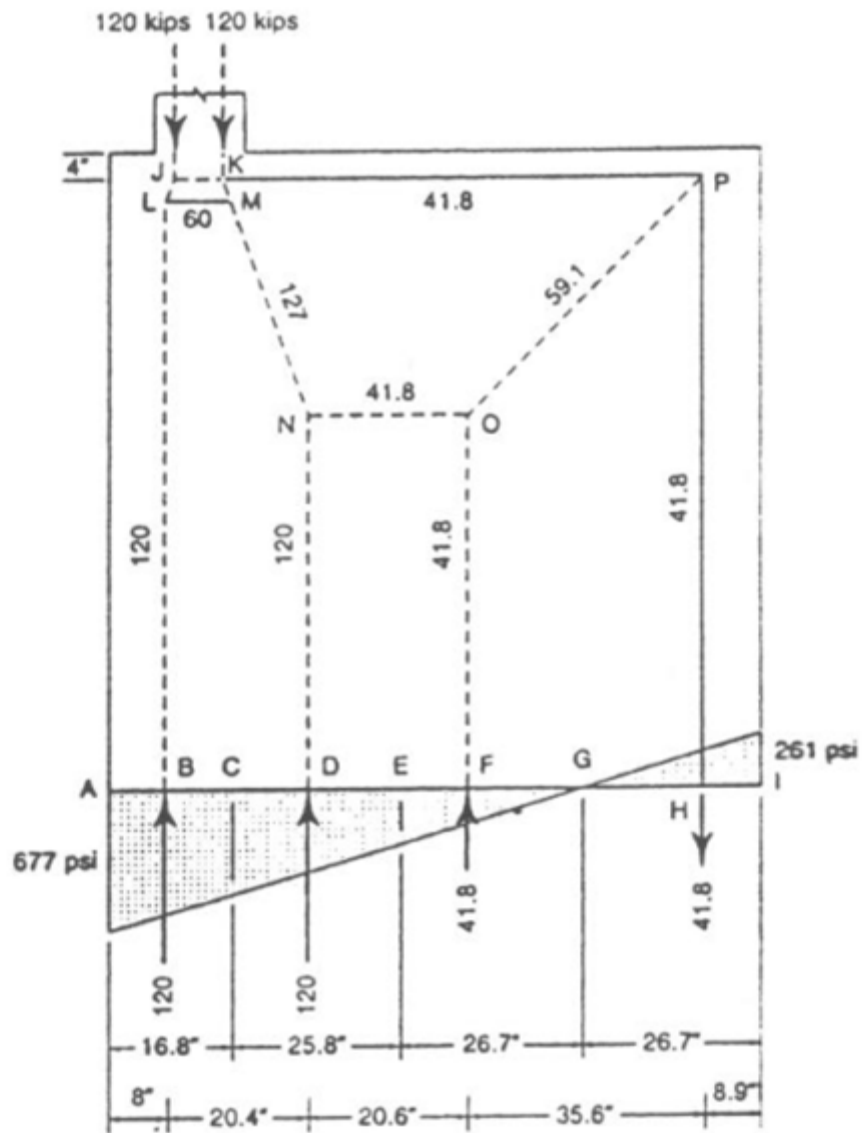
- ◆ Elastic Analysis based on Stress Trajectories
- ◆ Load Path Approach
- ◆ Standard Model

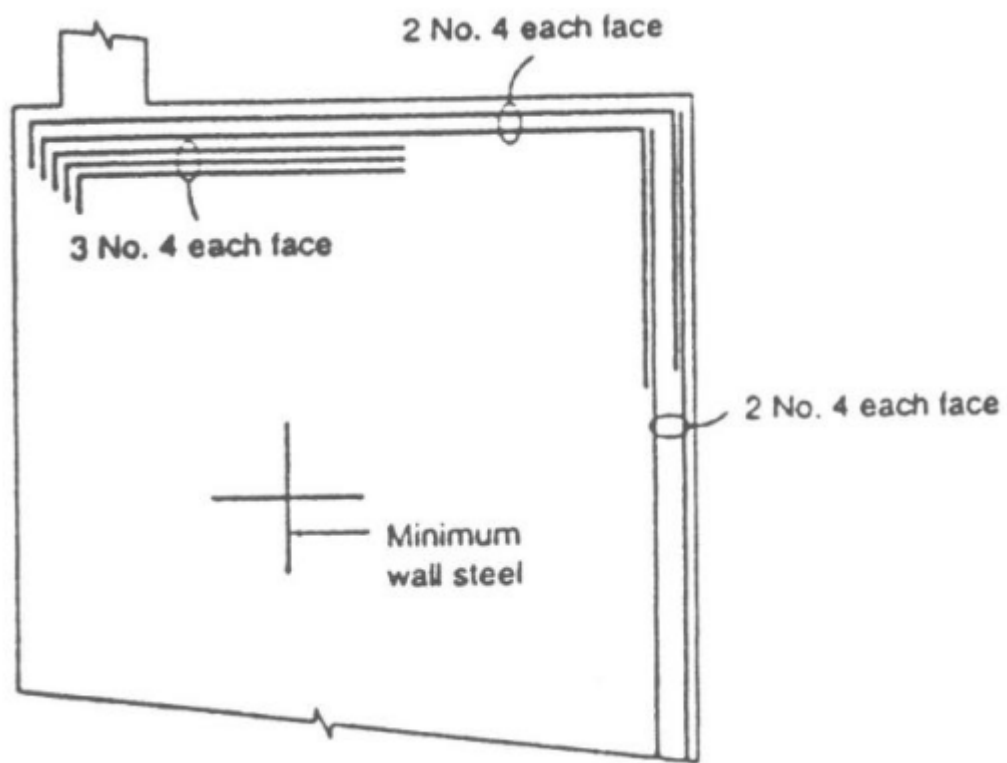


Uniform Load on a Deep Beam

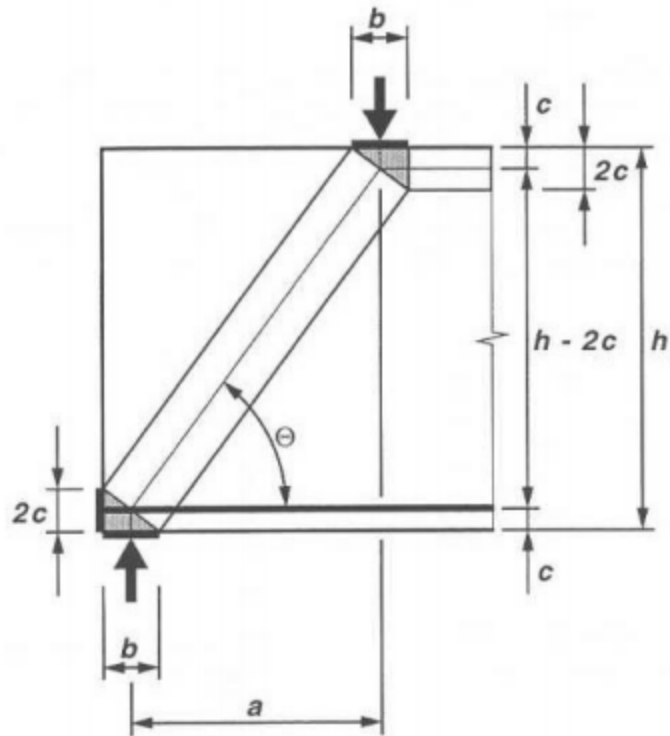


Eccentric Concentrated Load on Long Member

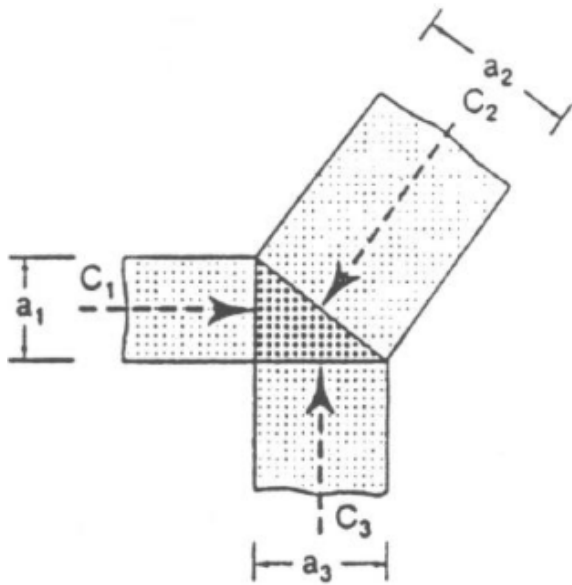




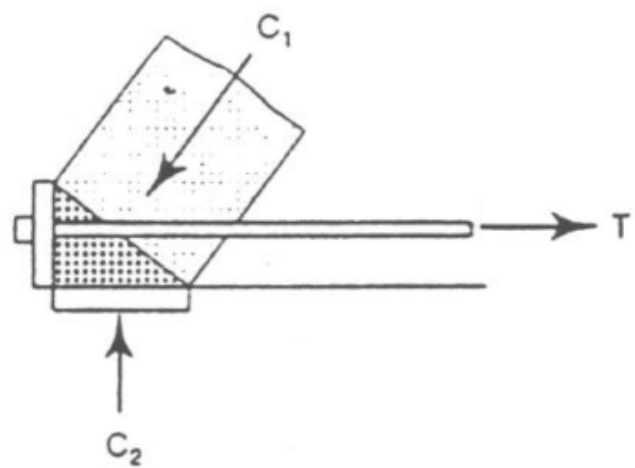
	Load Path	Strut-and-Tie Model
a) Eccentrically Loaded Member with Two Supports		
b) Member with Single Eccentric Load		



By similar triangles: $\tan \theta = \frac{h-2c}{a} = \frac{b}{2c}$

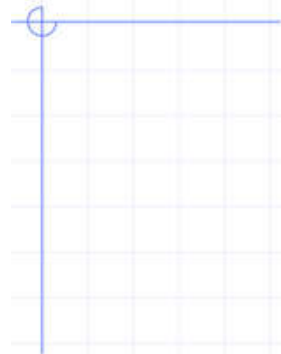


(a) CCC Node



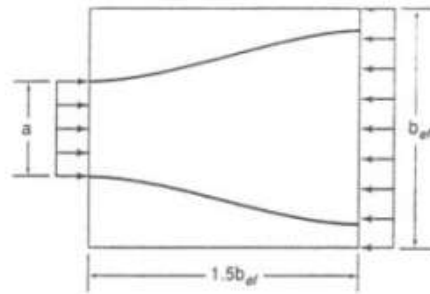
(b) CCT Node

Cracking of Compression Strut

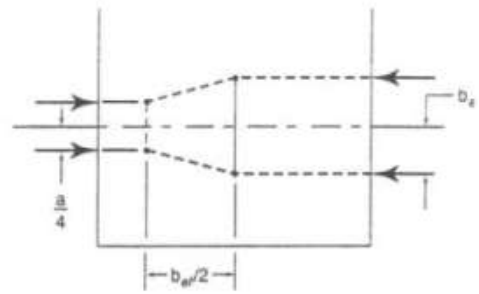


$$b_{ef} = a + \lambda/6$$

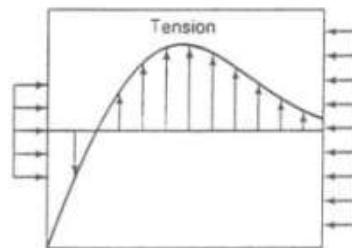
$$T = C(1 - a/b_{ef})/4$$



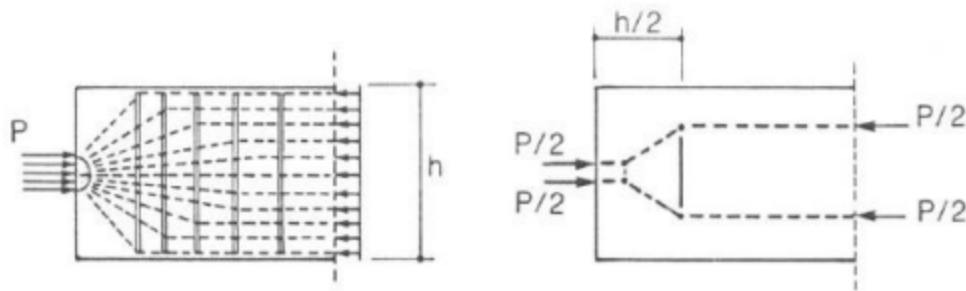
(a) Bottle-shaped region.



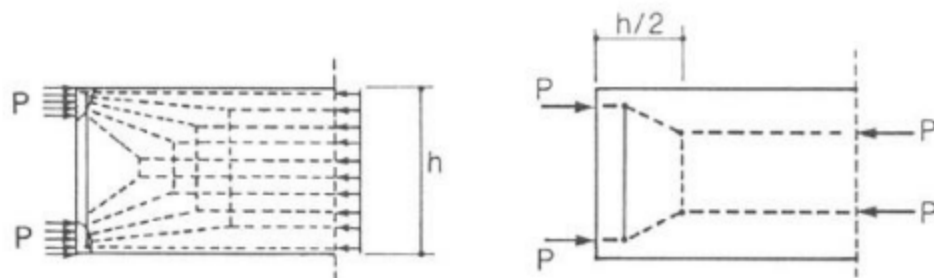
(b) Strut-and-tie model.



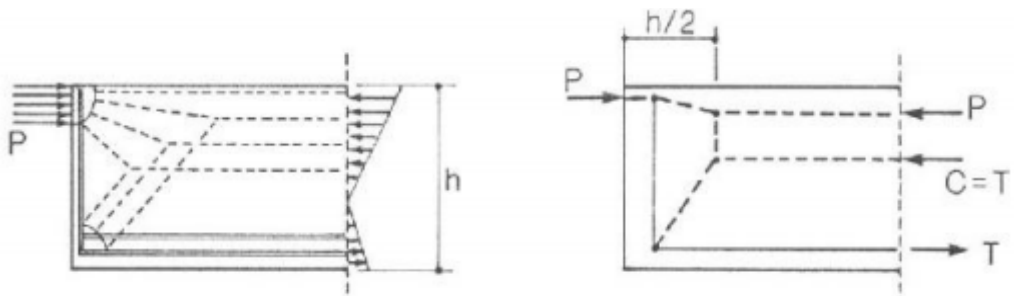
(c) Transverse tensions and compressions.



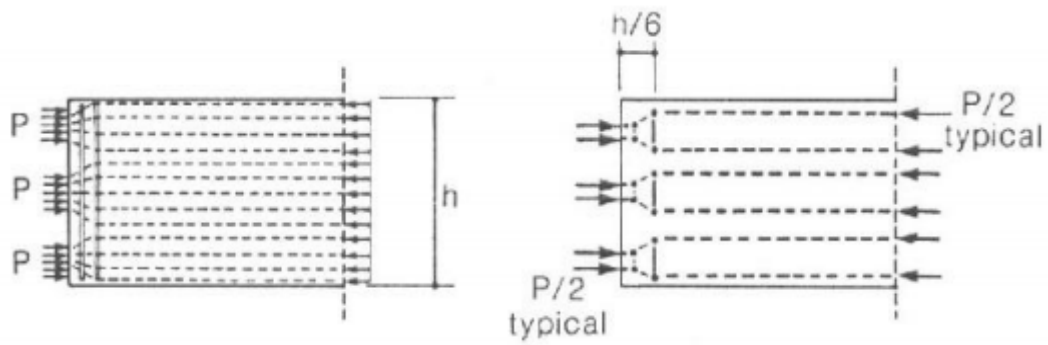
(a) Centrally located bearing plate



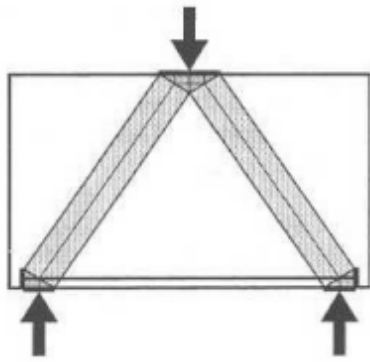
(b) Bearing plates at top and bottom



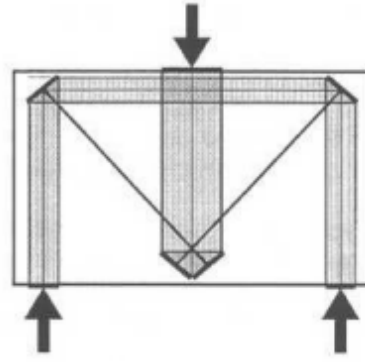
(c) Bearing plate at top



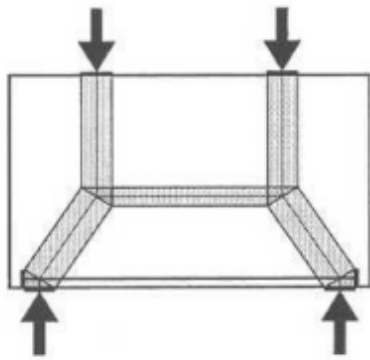
(d) Three symmetrically located bearings



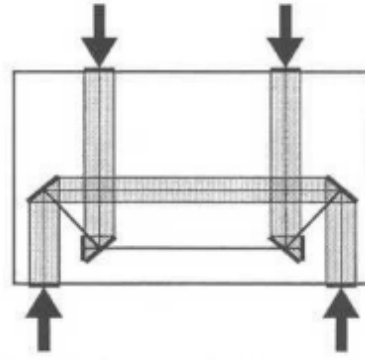
Good Model



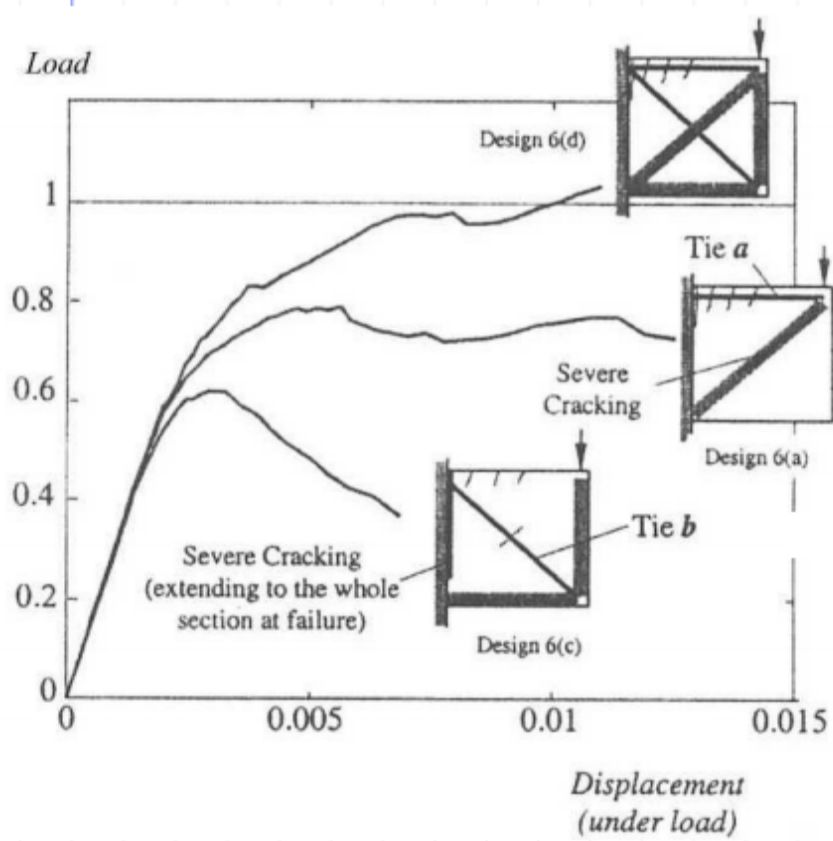
Poor Model



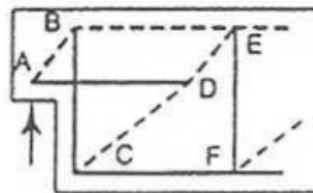
Good Model



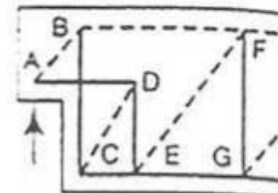
Poor Model



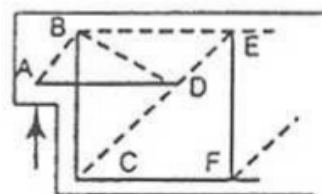
(a)



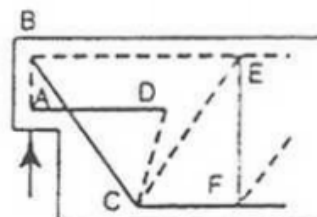
(b)



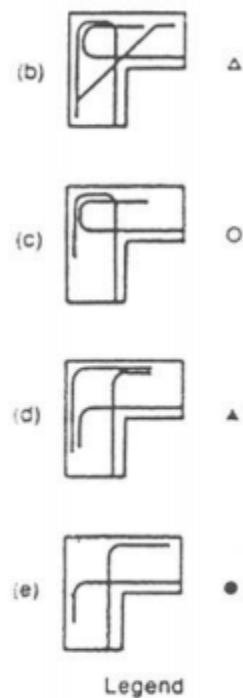
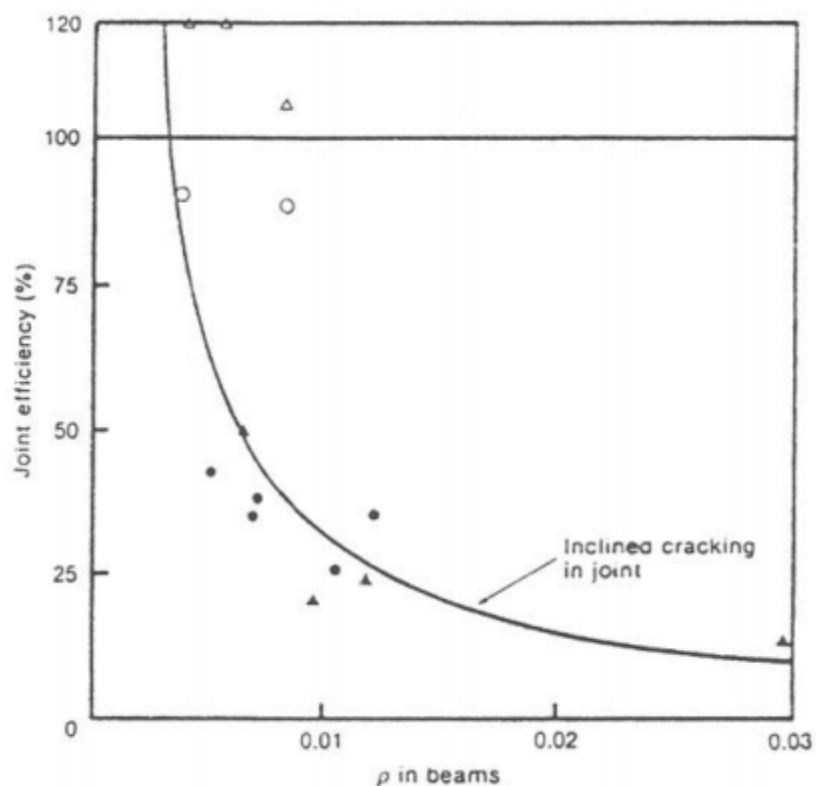
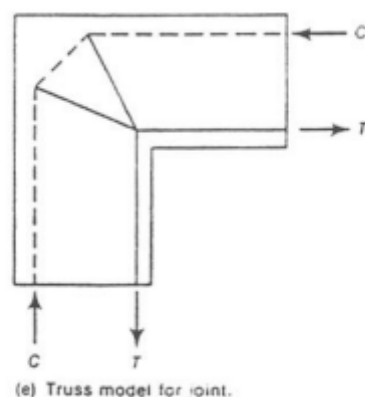
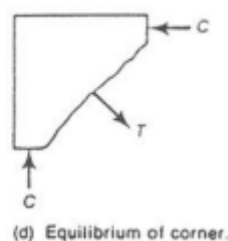
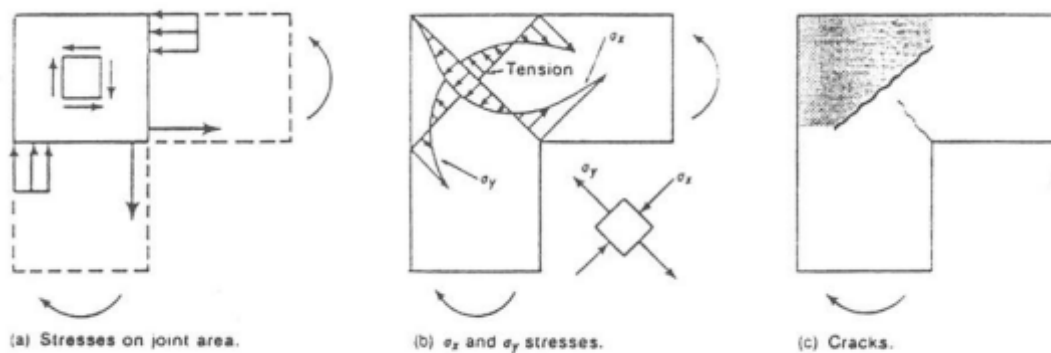
(c)



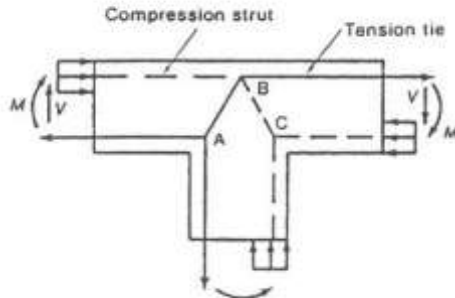
(d)



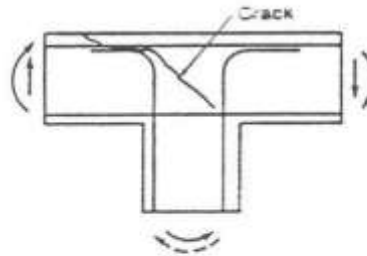
(e)



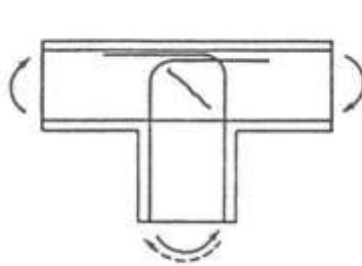
T-Joints



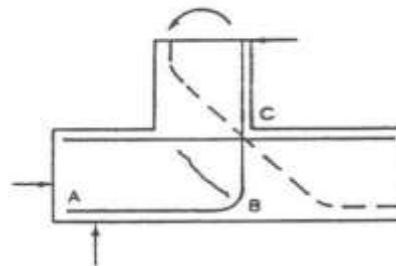
(a) Truss model of joint.



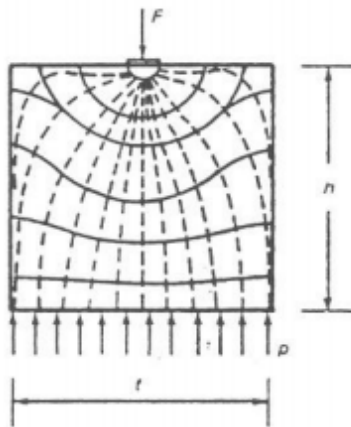
(b) Unsatisfactory detail.
—Interior column to
roof beam joints.



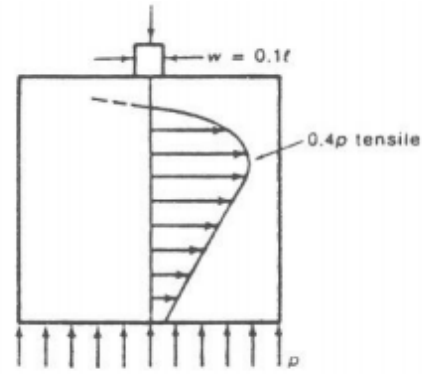
(c) Satisfactory detail.
—Interior column to
roof beam joint.



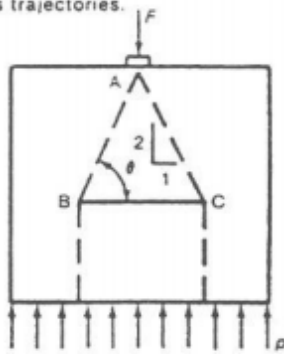
(d) Base of retaining wall.



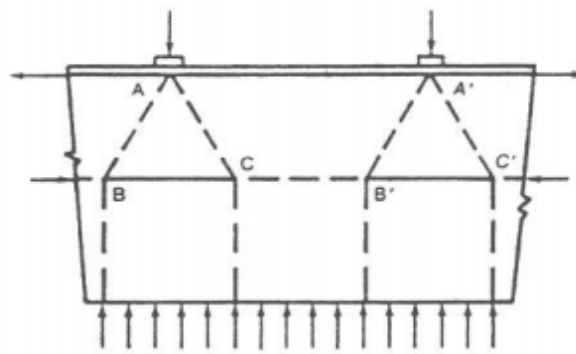
(a) Stress trajectories.



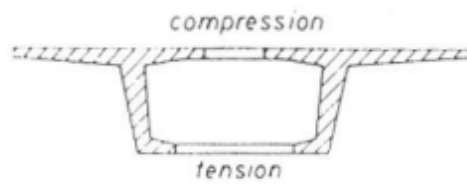
(b) Transverse tensile stresses.



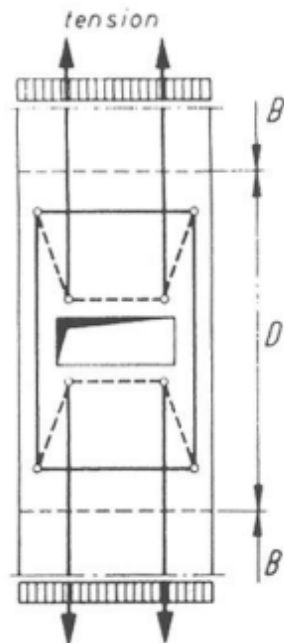
(c) Truss model.



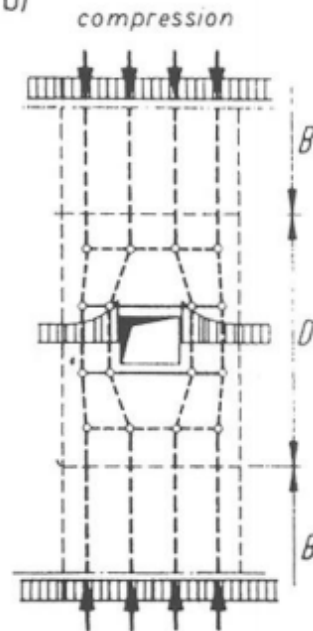
(d) Truss model for continuous wall.



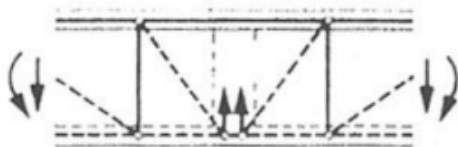
a)



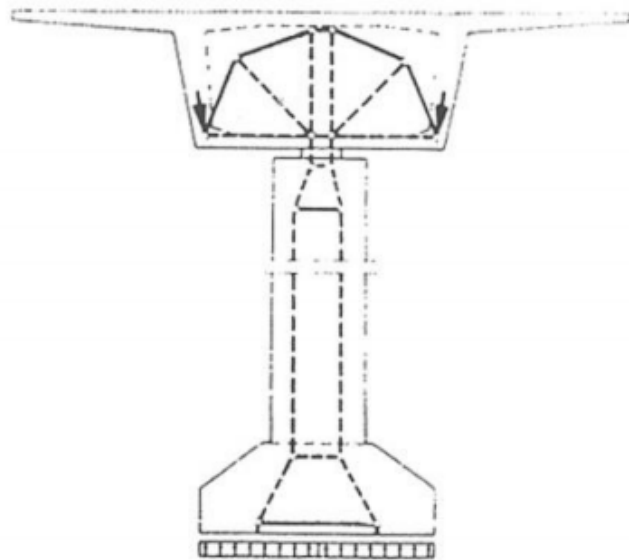
b)



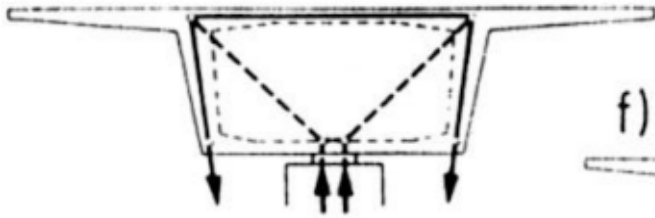
c)



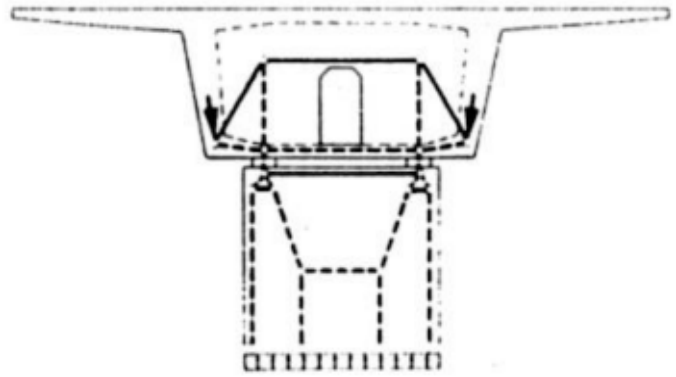
d)



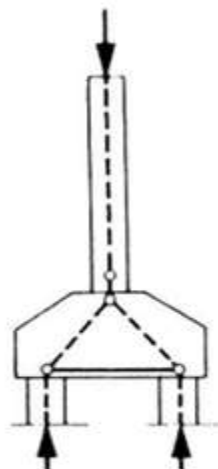
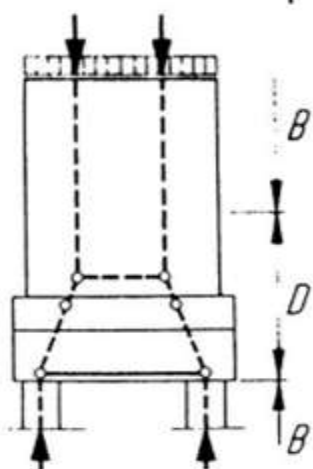
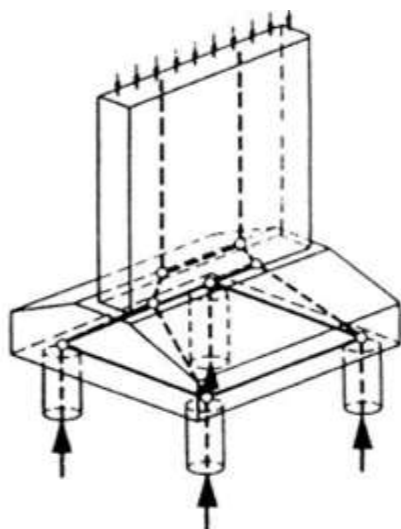
e)

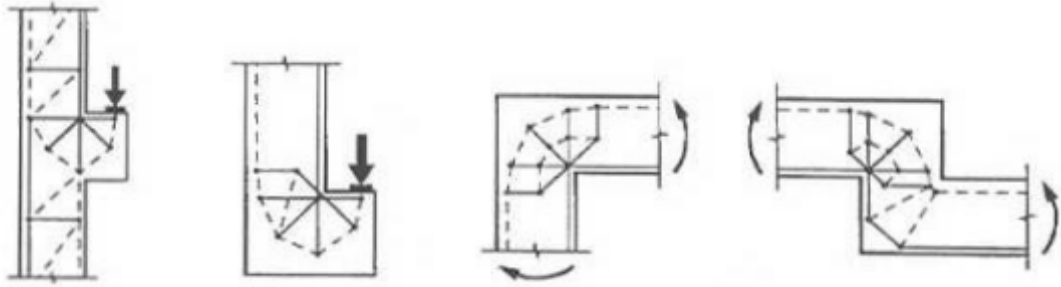


f)

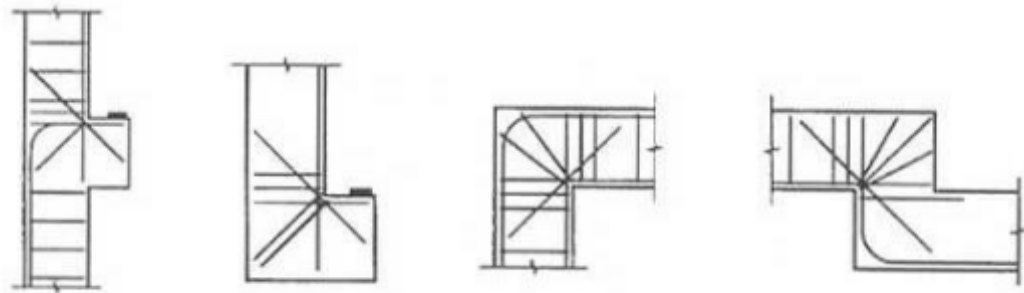


g)

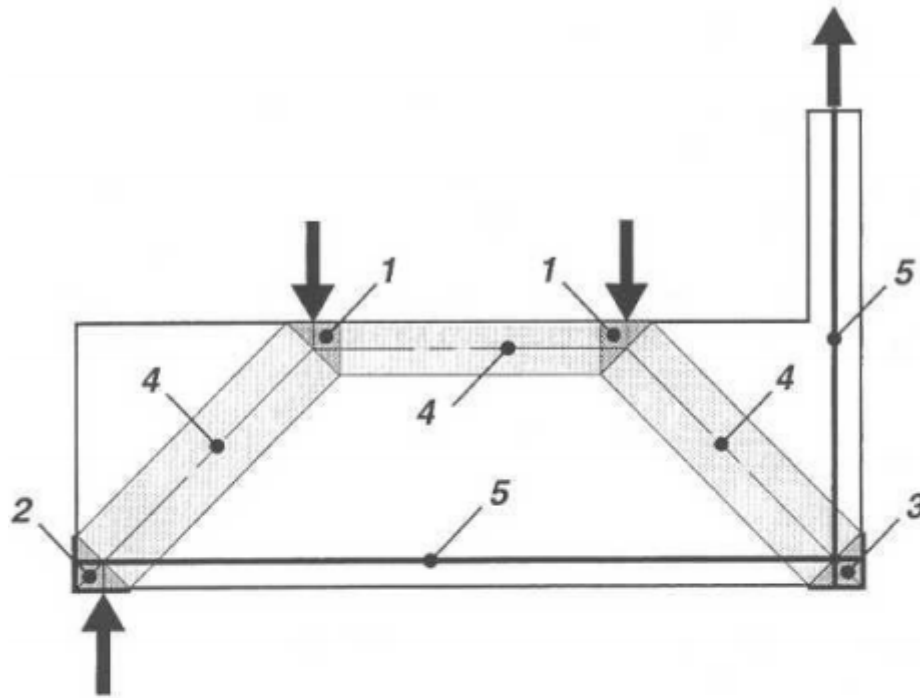




a) *Strut-and-Tie Model*



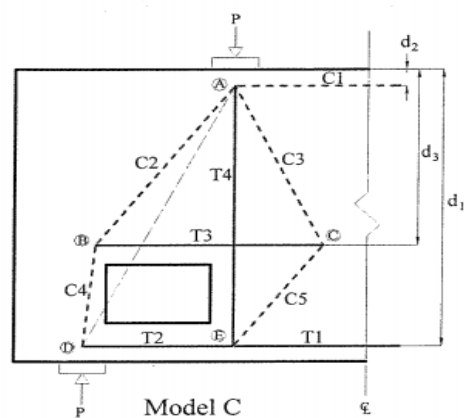
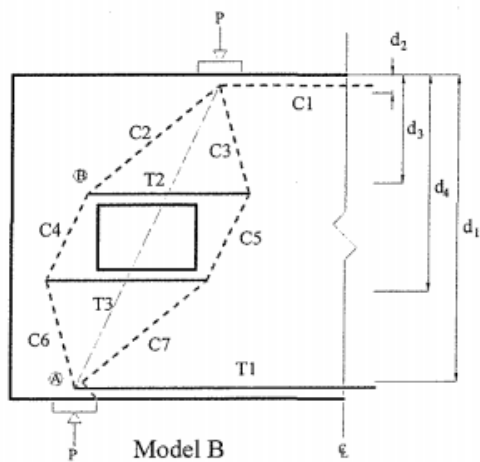
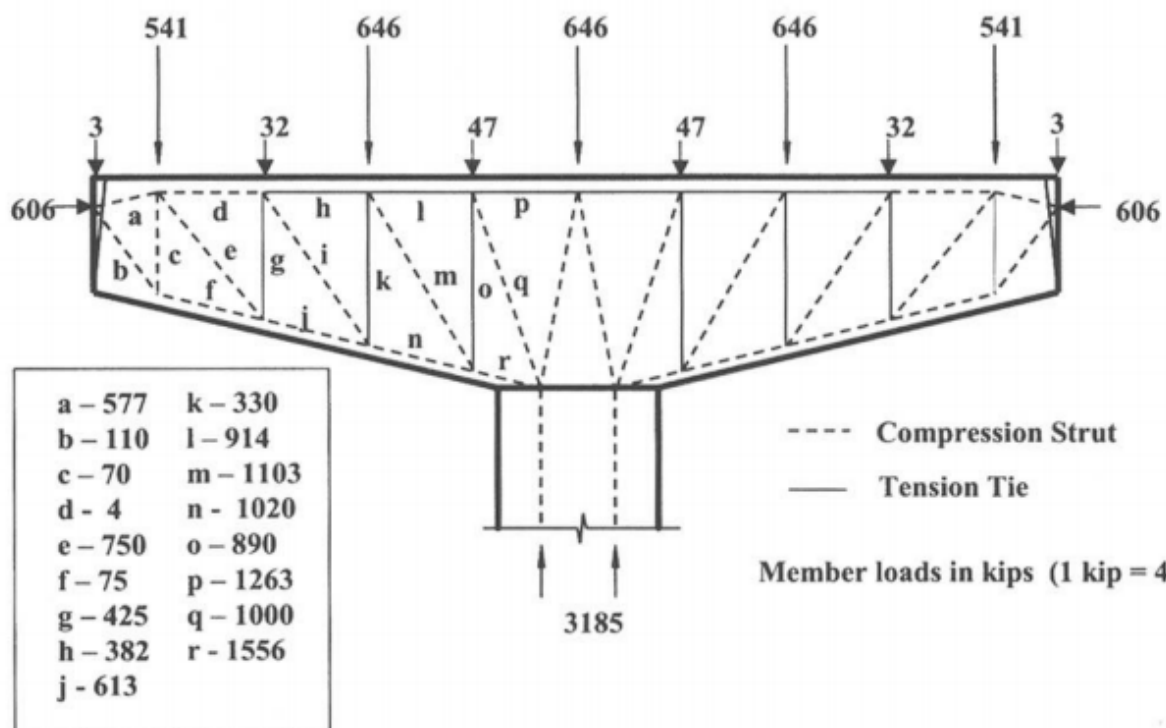
b) *Reinforcement*

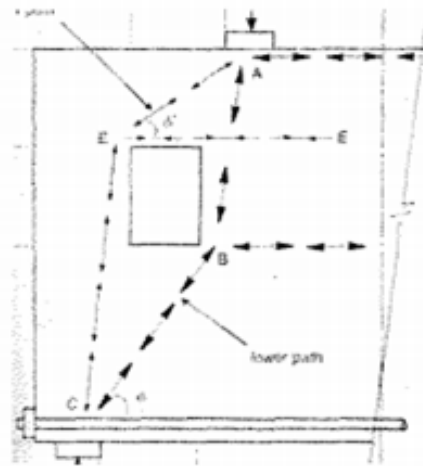
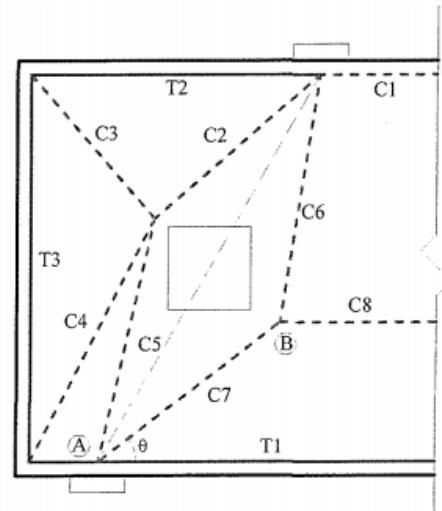
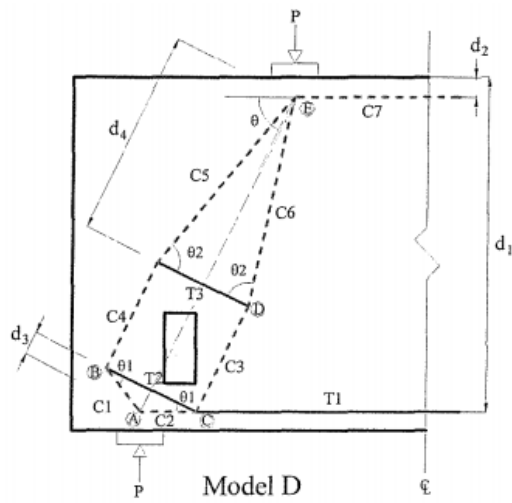


<u>Element</u>	<u>Limiting Stress</u>
1 - CCC Node	$0.85 \phi f'_c$
2 - CCT Node	$0.75 \phi f'_c$
3 - CTT or TTT Node	$0.65 \phi f'_c$
4 - Strut	f_{cu}
5 - Tie	f_y or $(f_{pe} + f_y)$

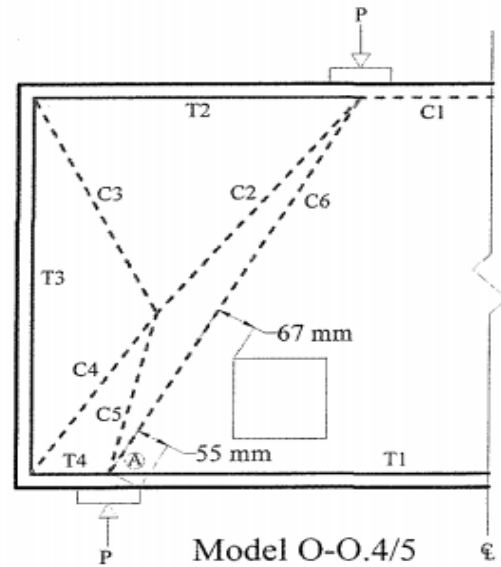
$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.8 + 170\epsilon_1} \leq 0.85 f'_c$$

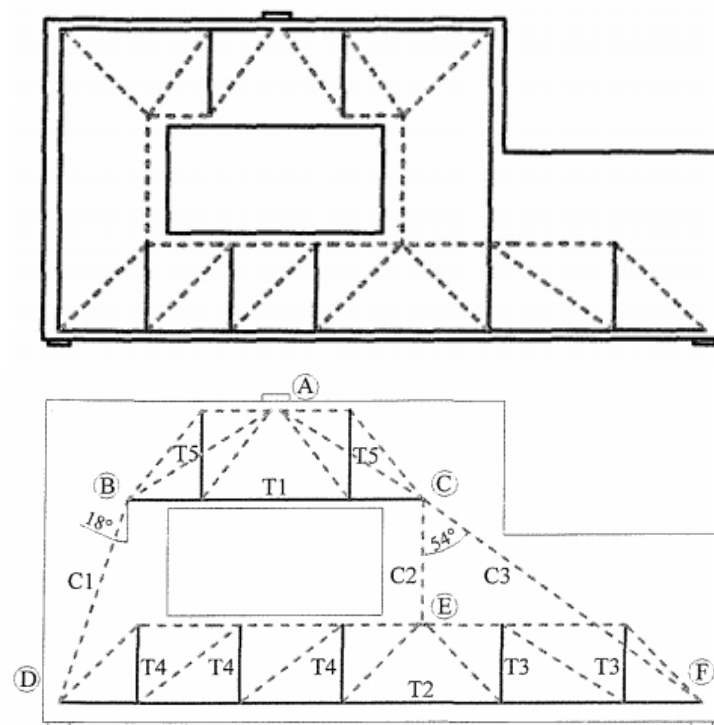
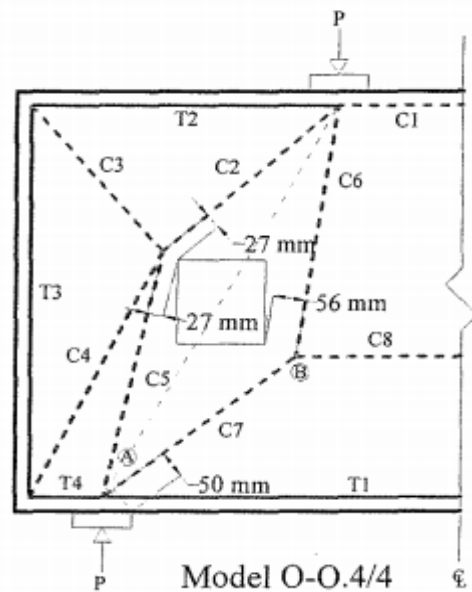
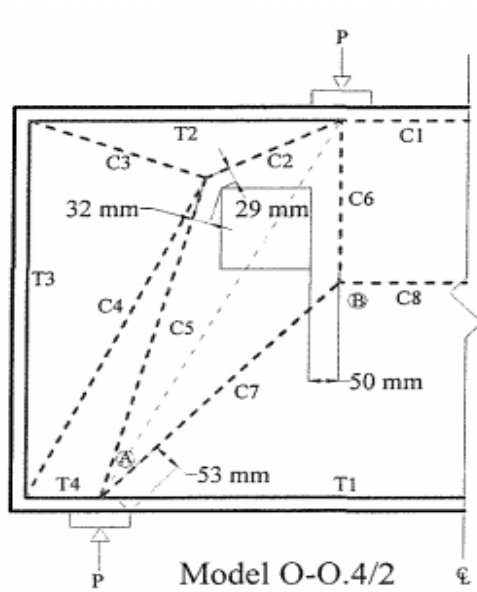
$$\epsilon_1 = (e_s + 0.002) \cot^2 a_s$$

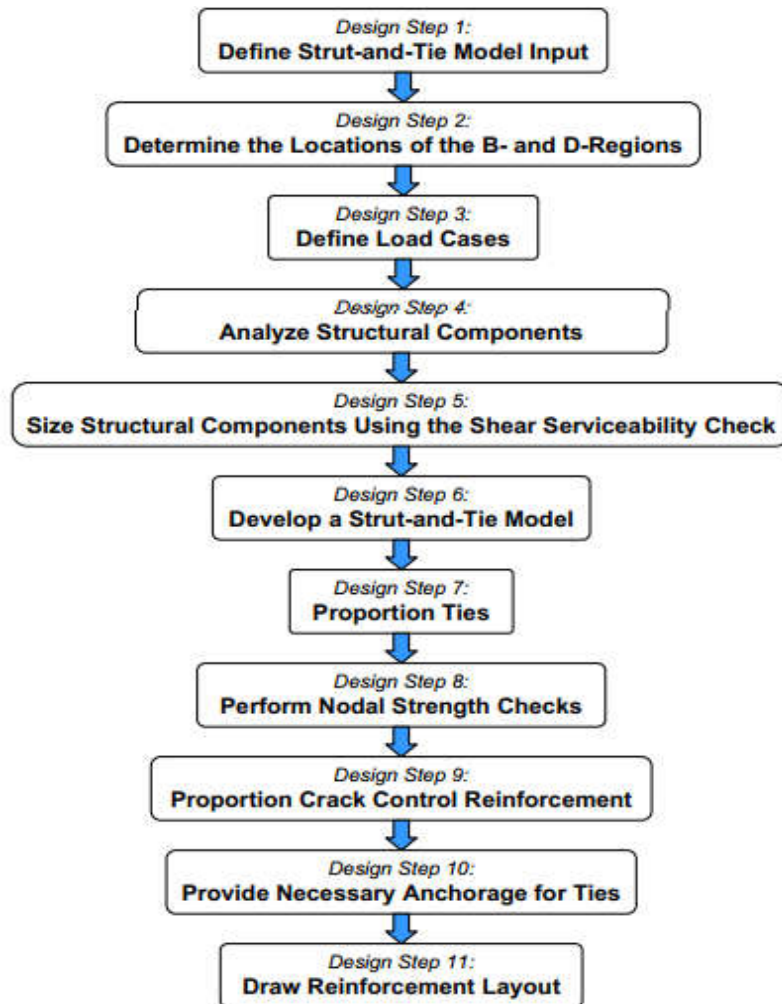


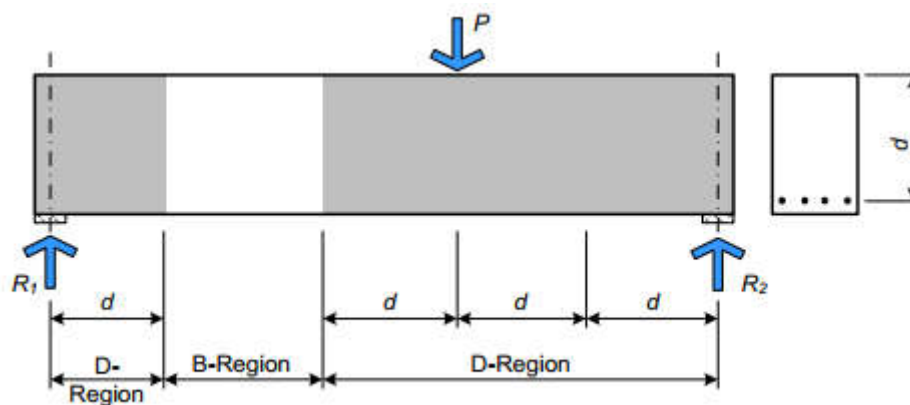
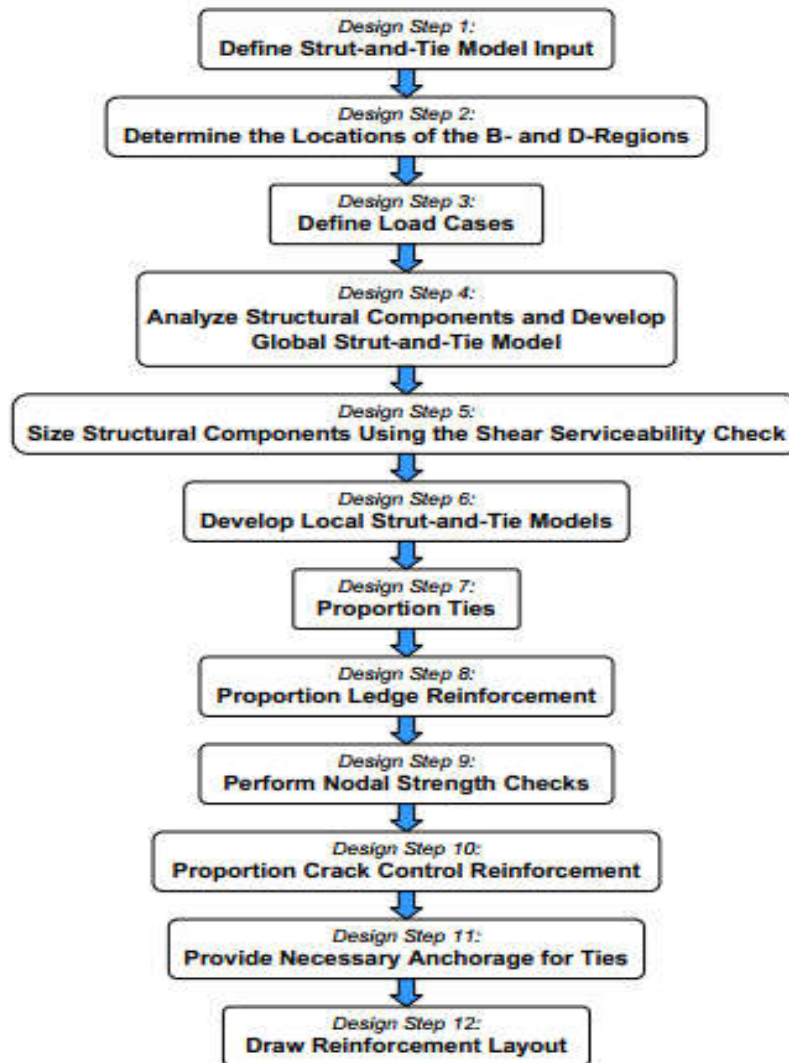


Ideal Load path presented by Kong (1973).

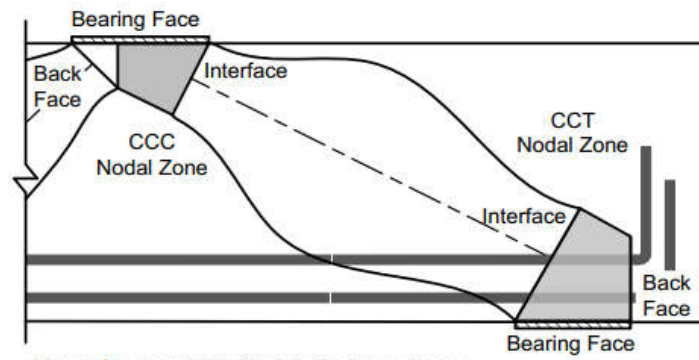
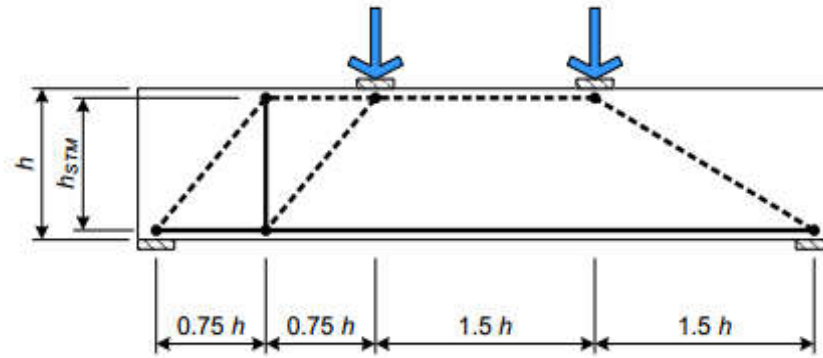




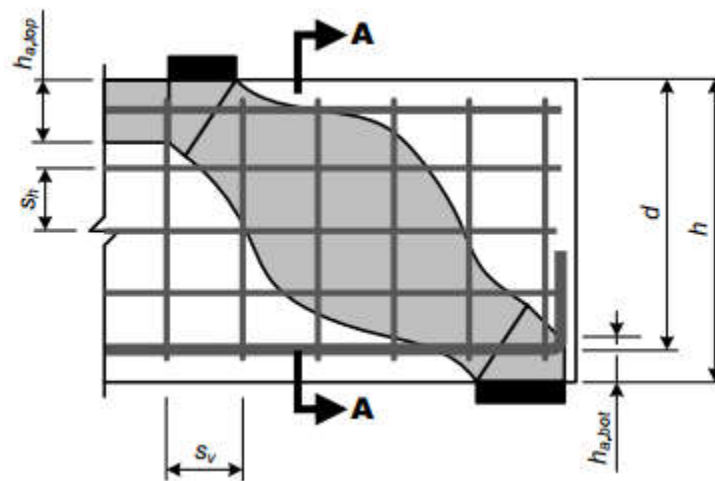


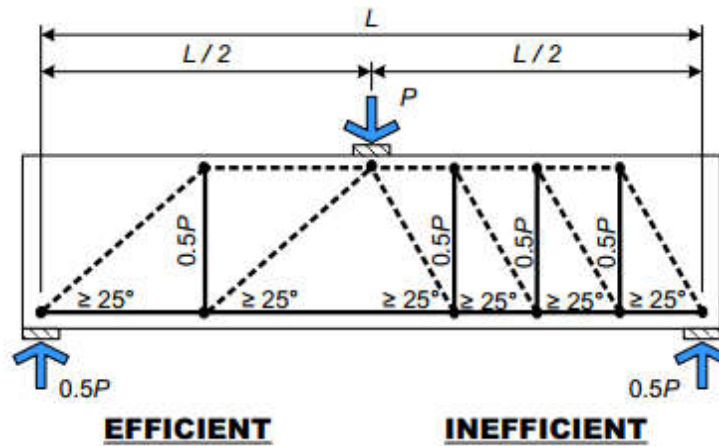


Definition of B- and D-Regions

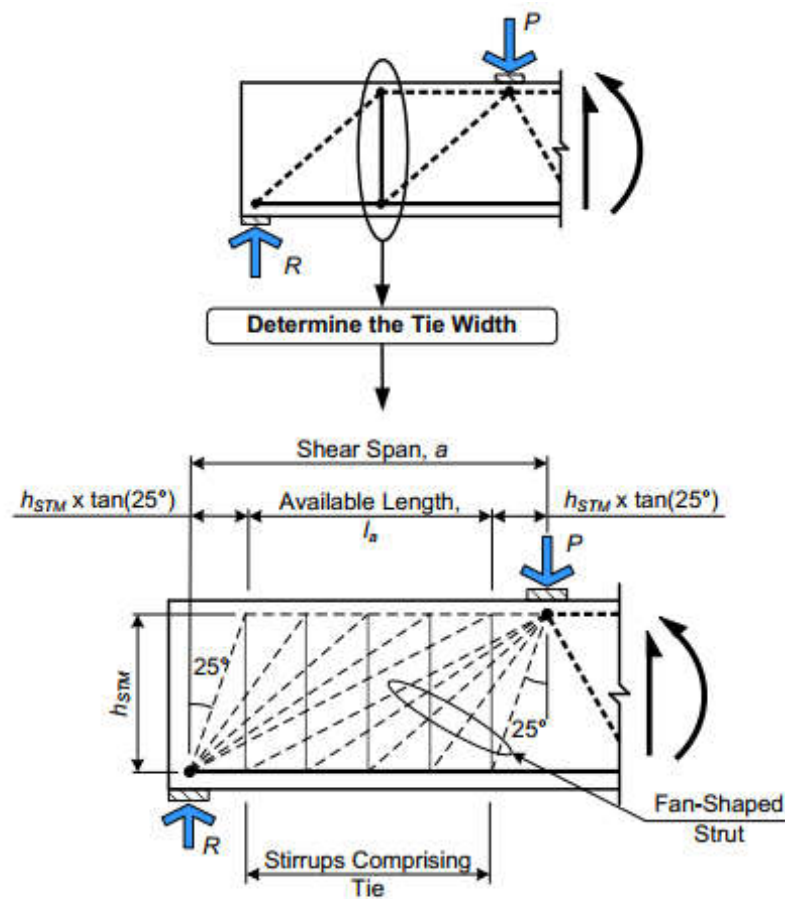


Direct Strut-and-Tie Model of a Deep Beam

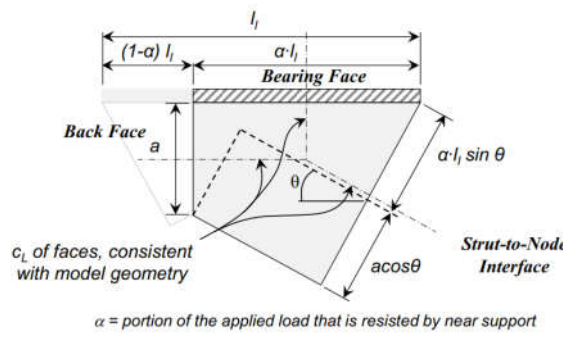




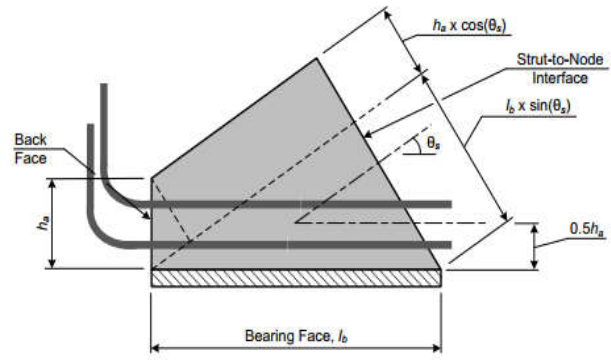
Efficient and Inefficient STM Models



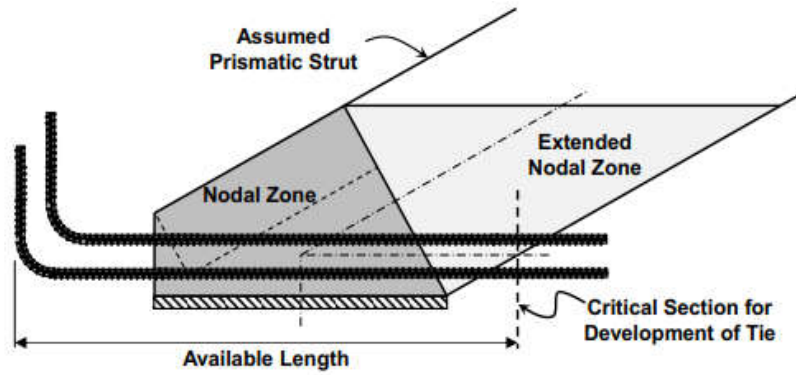
Fan-Shaped Struts Engaging Reinforcement, Forming a Tie

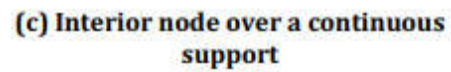
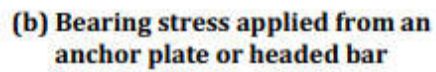
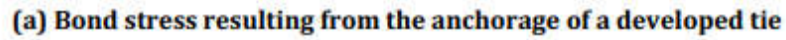


CCC Node

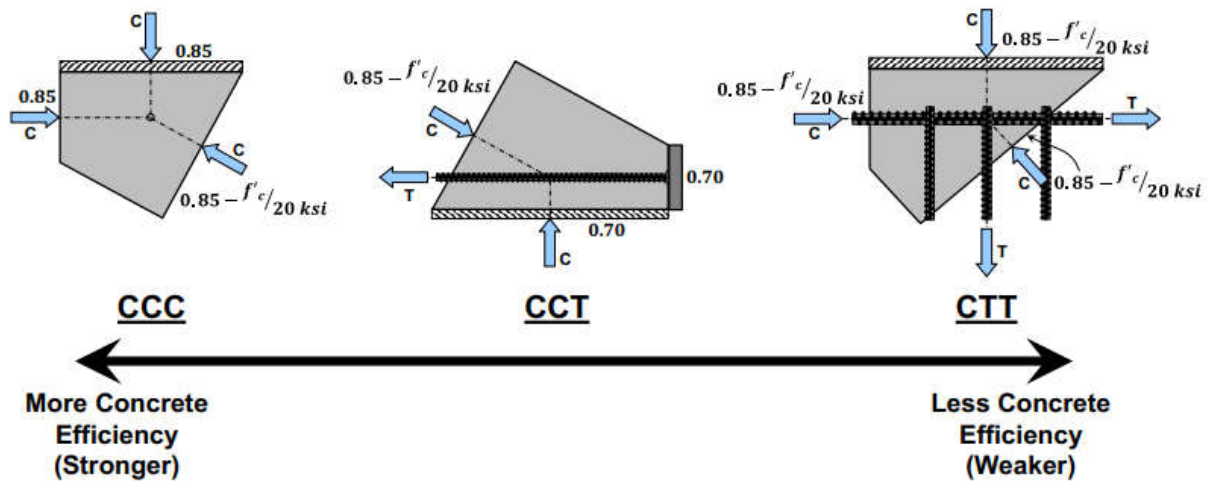


Geometry of a CCT Node





Stress Condition at the Back Face of a CCT Node

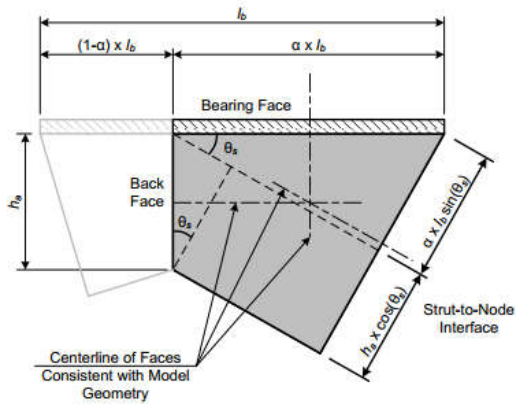


Concrete Efficiency Factors, ν

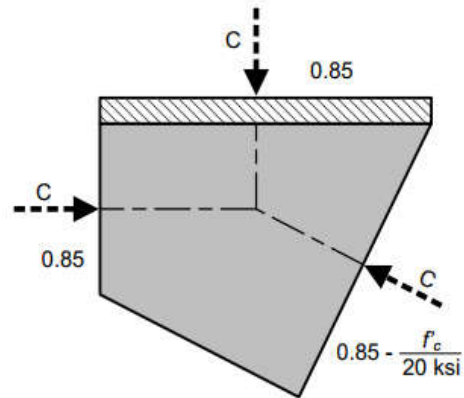
Face	CCC Node	CCT Node	CTT Node
Bearing Face	0.85	0.70	$0.85 - \frac{f'_c}{20 \text{ ksi}}$ $0.45 \leq \nu \leq 0.65$
Back Face	0.85	0.70	$0.85 - \frac{f'_c}{20 \text{ ksi}}$ $0.45 \leq \nu \leq 0.65$
Strut-to-Node Interface	$0.85 - \frac{f'_c}{20 \text{ ksi}}$ $0.45 \leq \nu \leq 0.65$	$0.85 - \frac{f'_c}{20 \text{ ksi}}$ $0.45 \leq \nu \leq 0.65$	$0.85 - \frac{f'_c}{20 \text{ ksi}}$ $0.45 \leq \nu \leq 0.65$

NODAL AND STRUT STRESS LIMITS

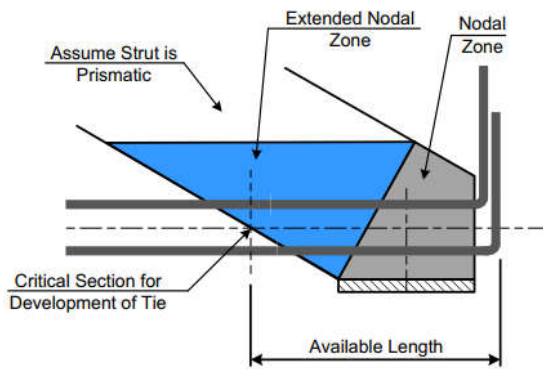
Strength of struts	Strength of nodes
$F_{ns} = f_{ce} A_{cs}$	$F_{nn} = f_{ce} A_{nz}$
$f_{ce} = 0.85 \beta_s f'_c$	$f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c$
A_{cs} = Cross sectional area of the strut. $\beta_s = 1.0$ (prismatic struts) $= 0.75$ (bottle shaped with crack control reinforcement as per Eq.5) $= 0.6$ (bottle shaped without crack control reinforcement as per Eq 5)	A_{ns} = Area of the face of the nodal zone f'_c = cylinder compressive strength of concrete $\beta_n = 1.0$ (CCC node) $= 0.8$ (CCT node) $= 0.6$ (CTT node)



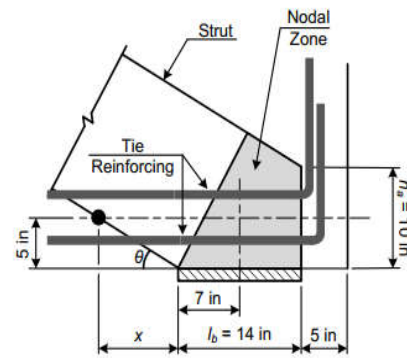
Geometry of a CCC Node



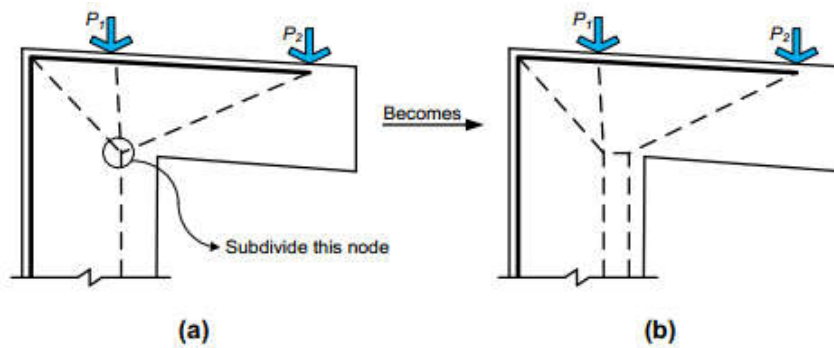
Concrete Efficiency Factors for CCC Nodes



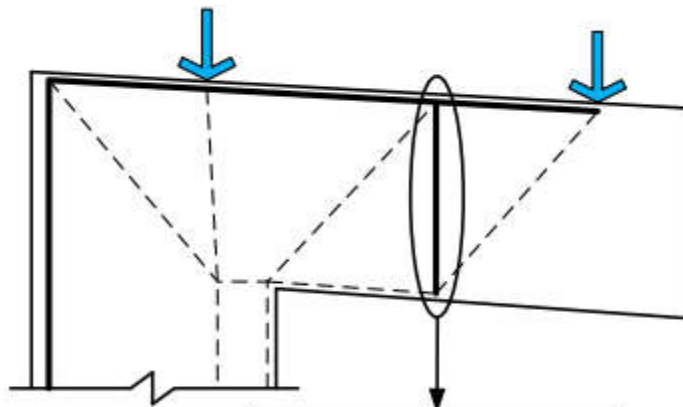
Available Development Length for Ties



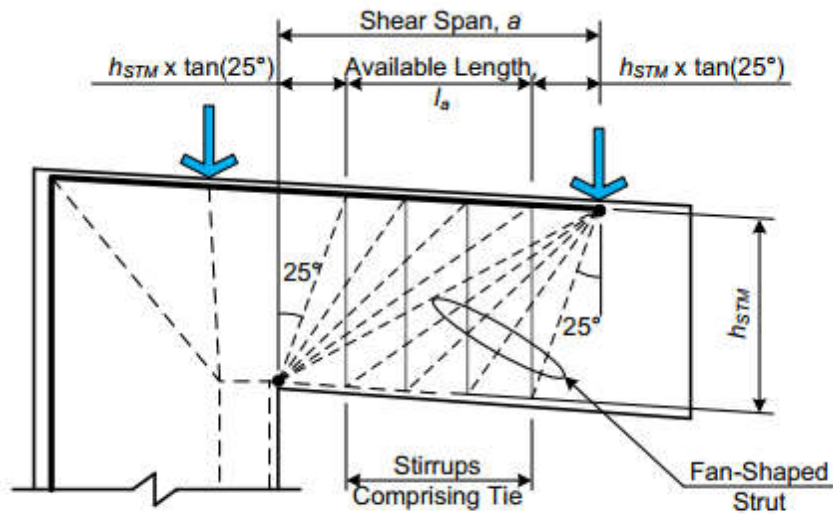
Geometry of Tie End Hook Development near Node C



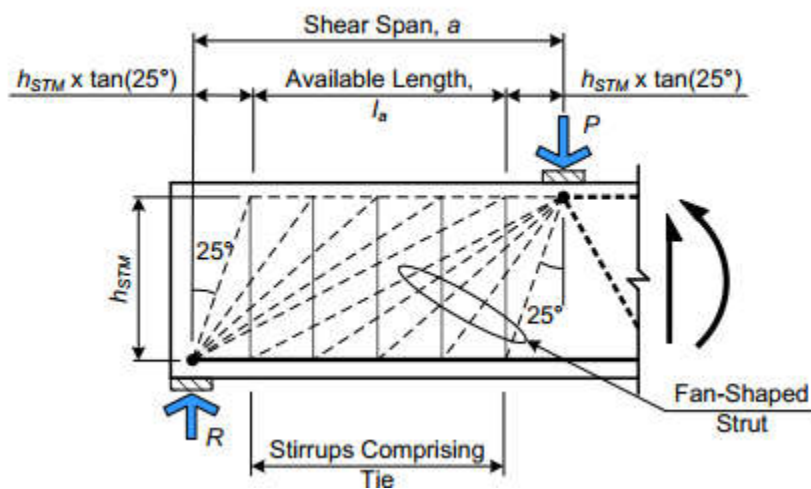
Modeling Compressive Forces within the Column: (a) Using a Single Strut and (b) Using Two Struts

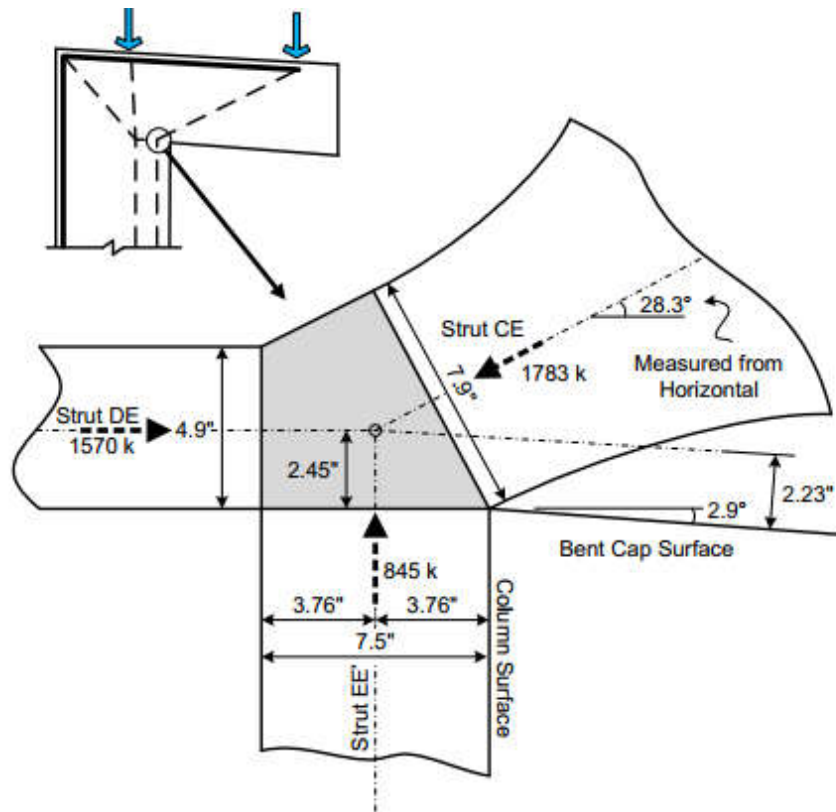


Determine the Tie Width

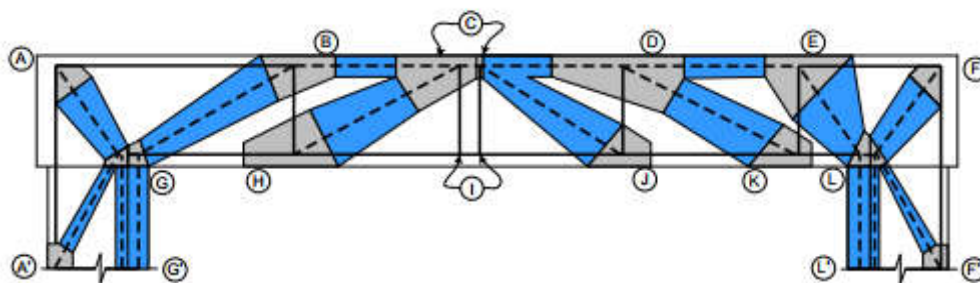


Fan-Shaped Struts Engaging Reinforcement, Forming a Tie

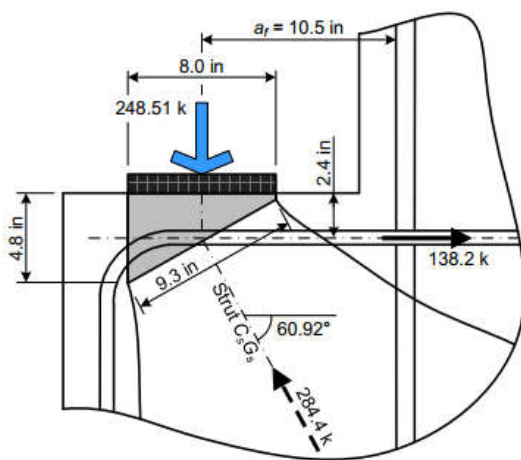
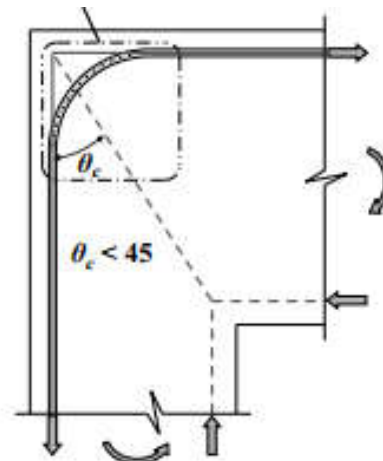
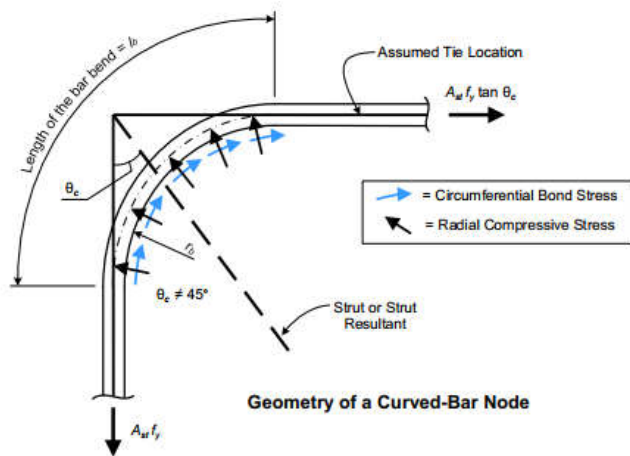




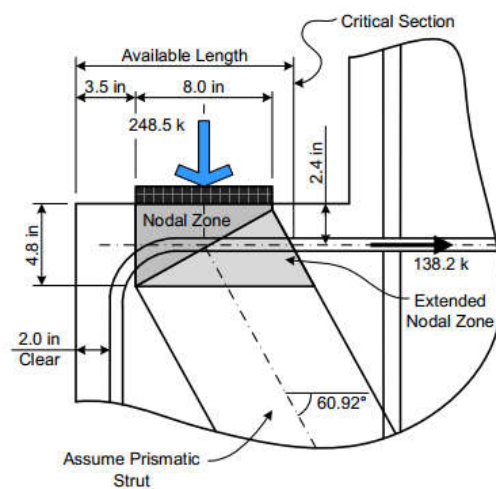
Geometry and Forces at Node E



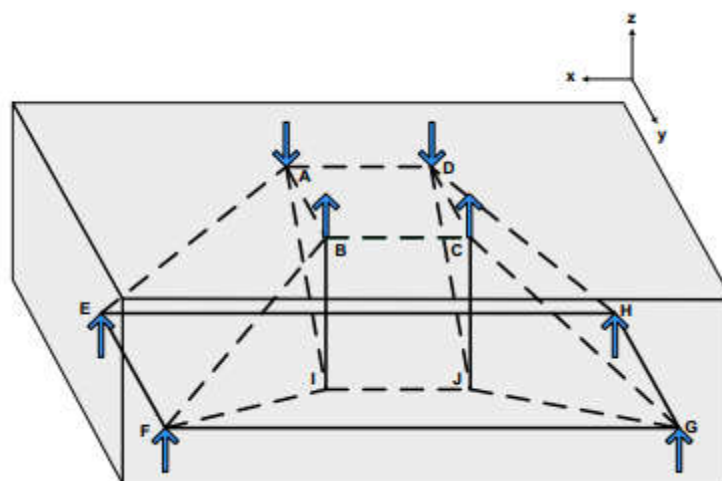
Struts and Nodes within the Inverted-Tee Cap Beam

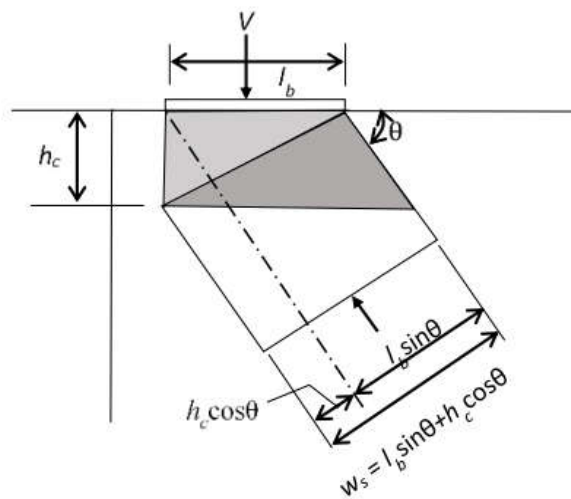
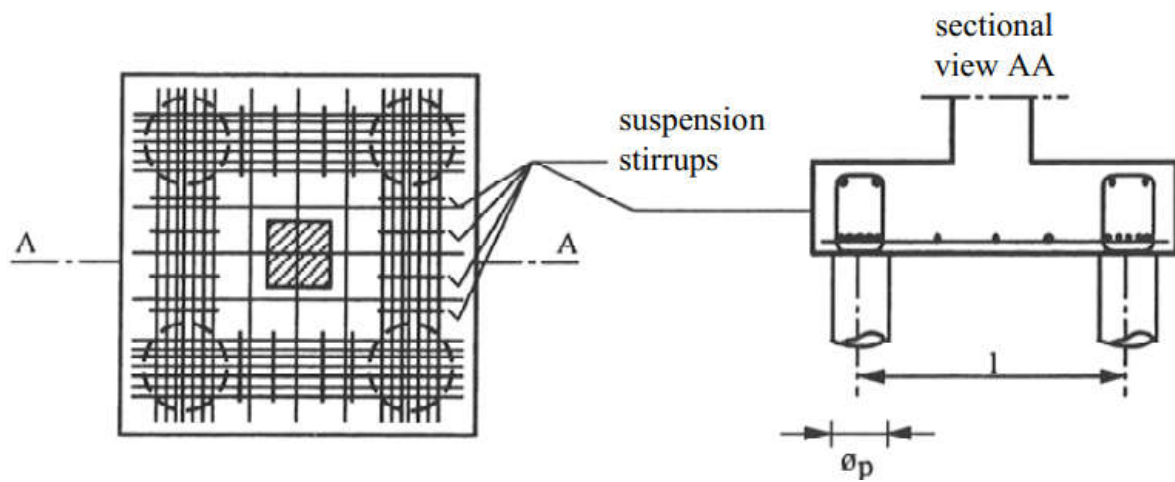


Node C_s of Local Strut-and-Tie Model

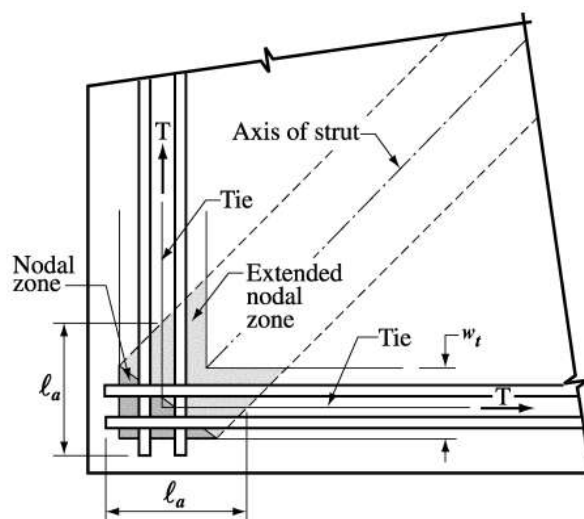


Ledge Reinforcement Anchorage at Node C_s

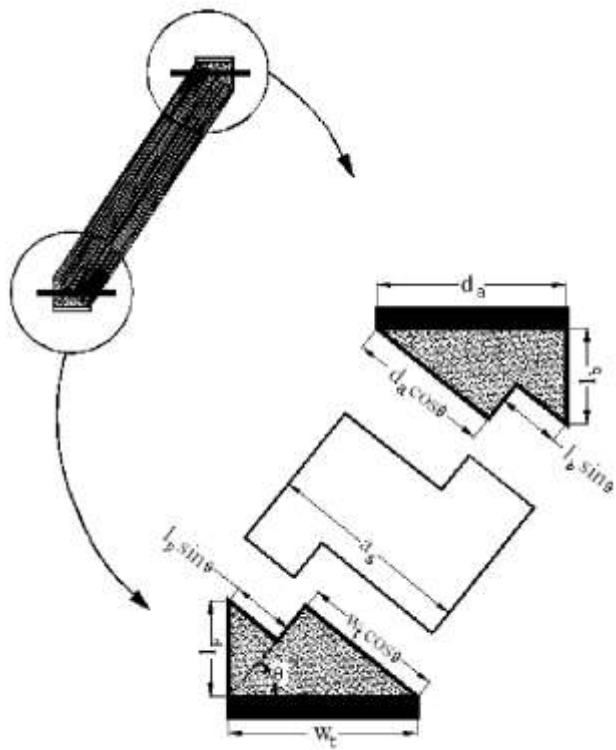




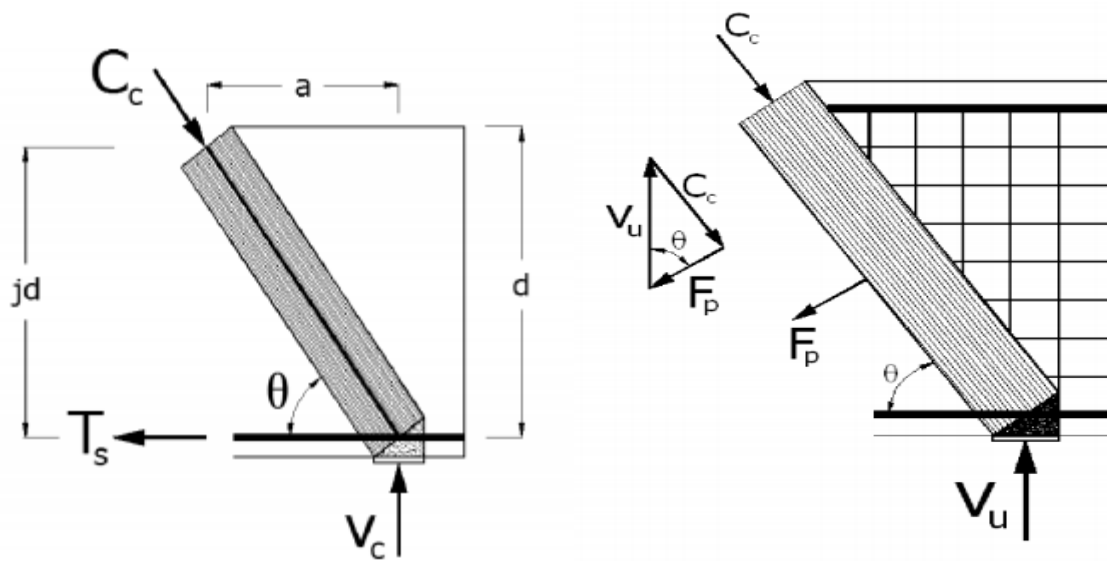
Nodal zone at typical CCC node

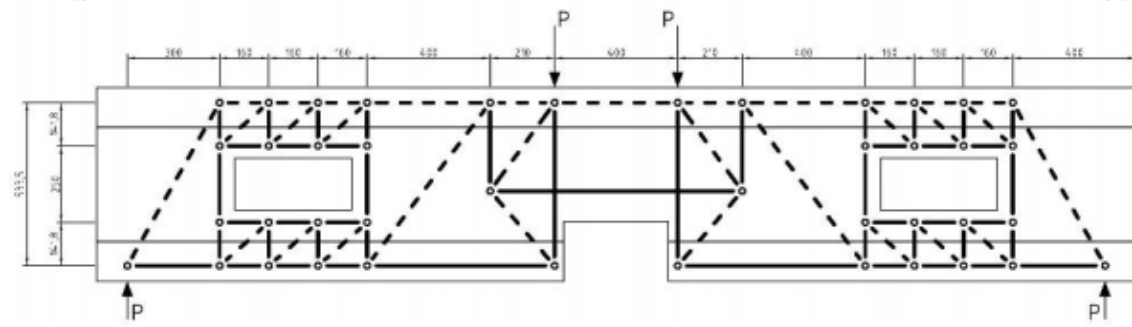
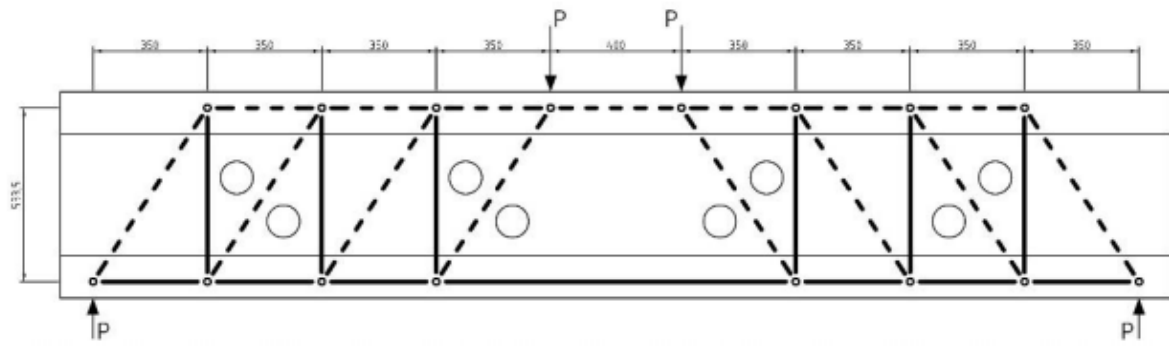
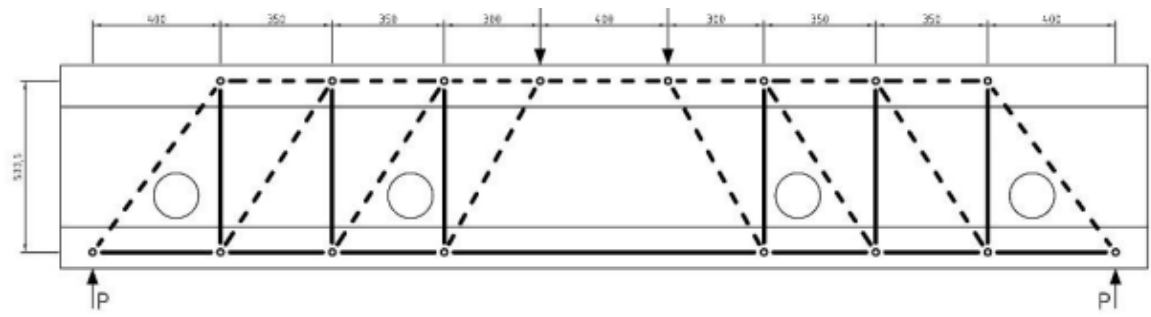


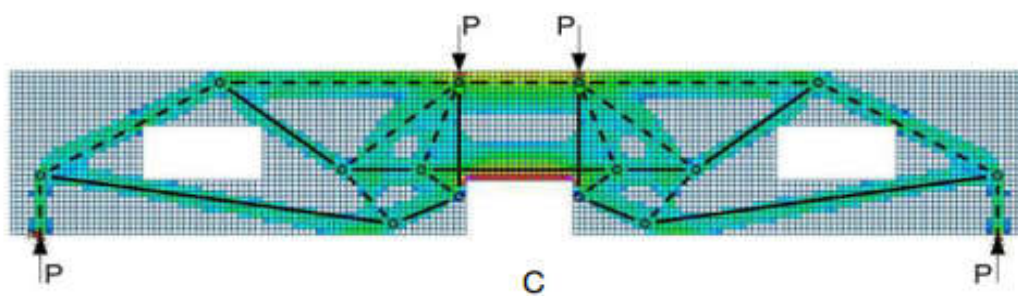
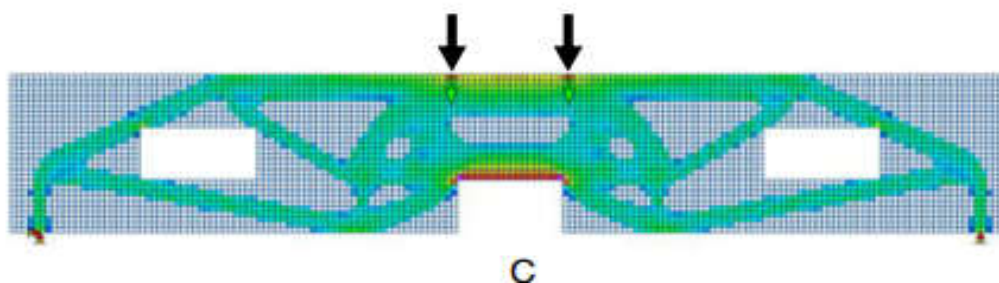
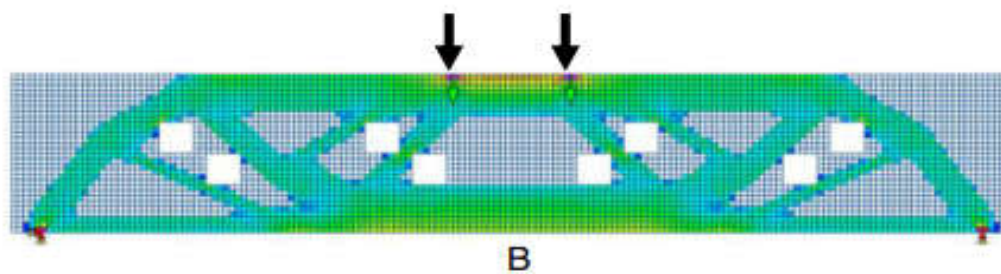
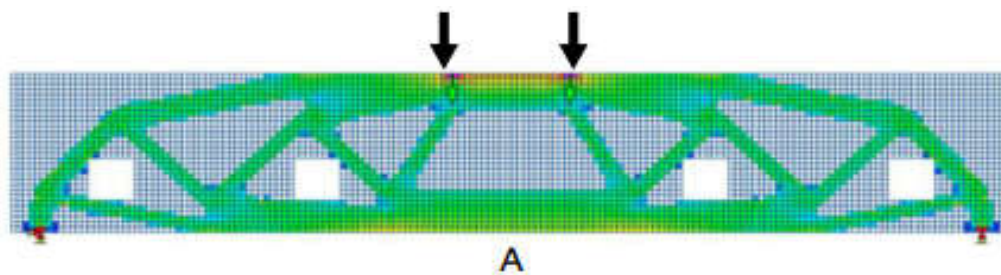
Extended nodal zone anchoring two ties.

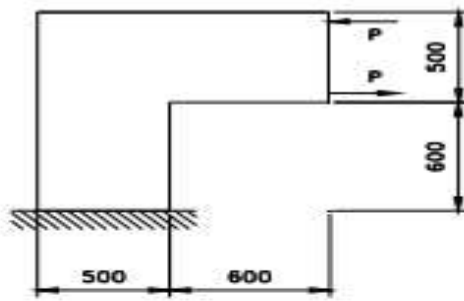


Prismatic strut geometry

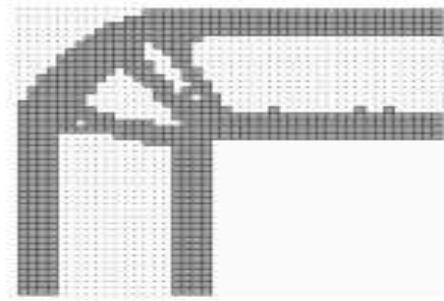




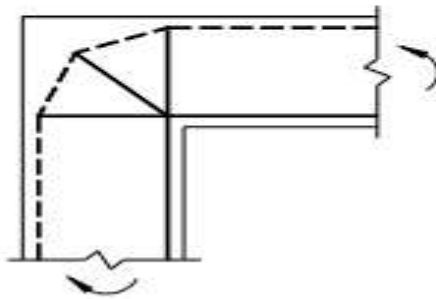




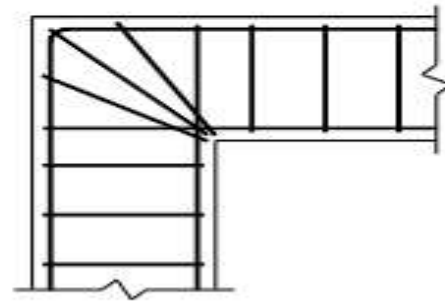
(a) Structural model



(b) Optimal topology

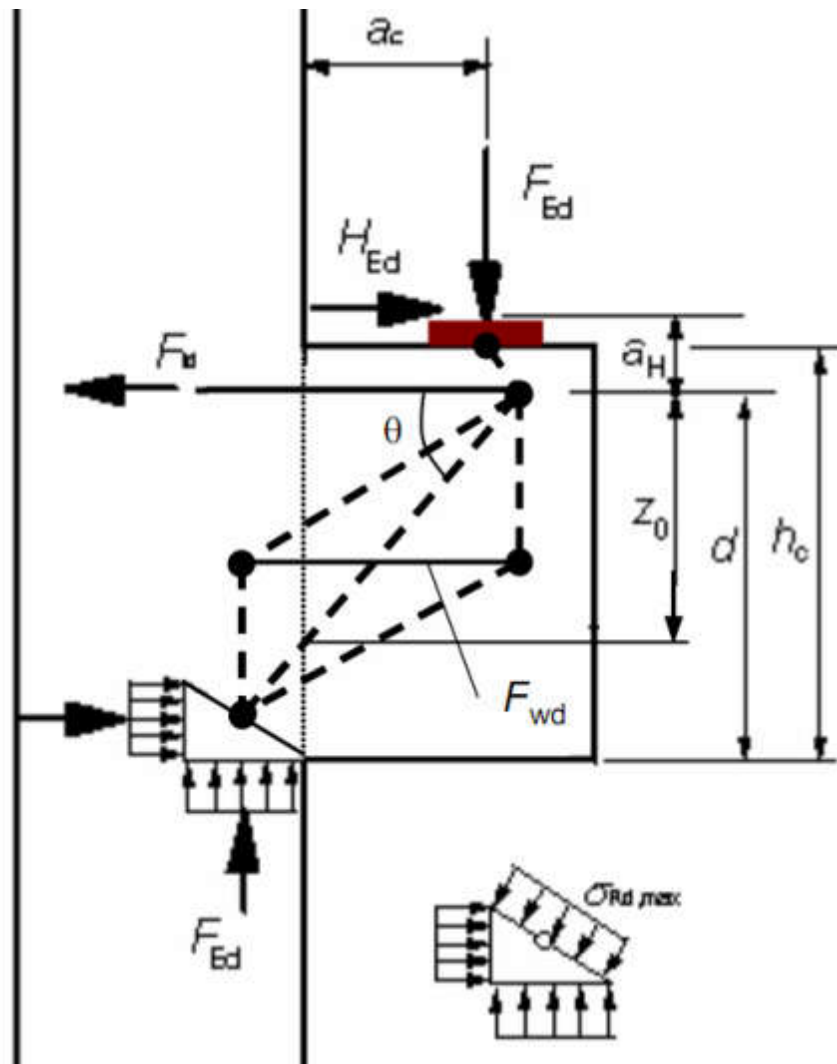


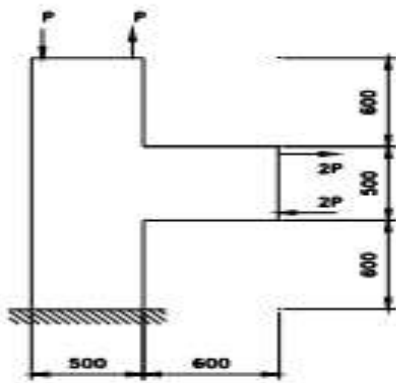
(c) Strut-and-tie model



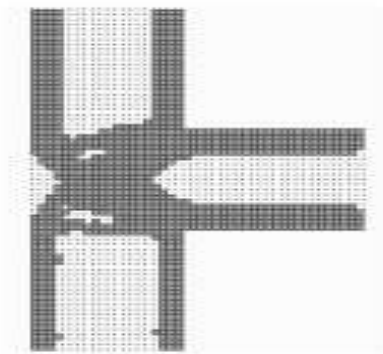
(d) Reinforcement

Opening knee joint

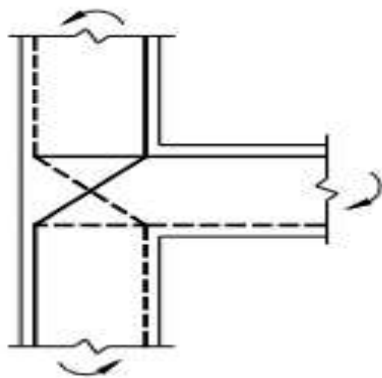




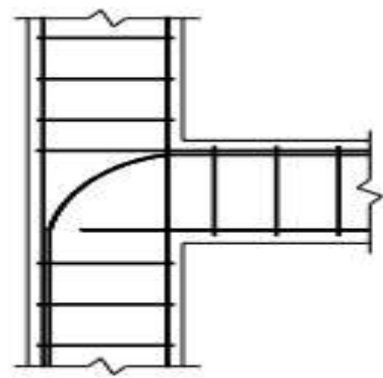
(a) Structural model



(b) Optimal topology

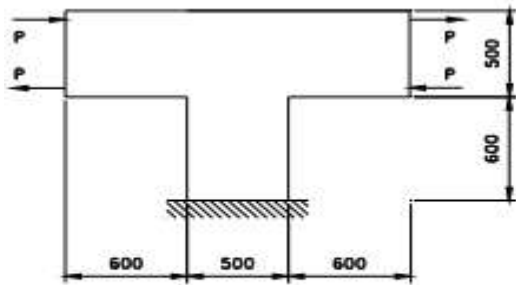


(c) Strut-and-tie model

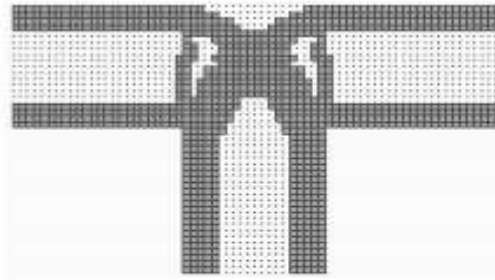


(d) Reinforcement

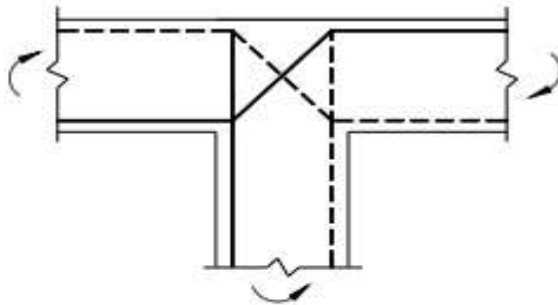
Exterior beam-column connection



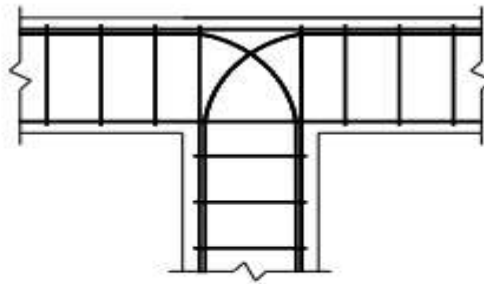
(a) Structural model



(b) Optimal topology

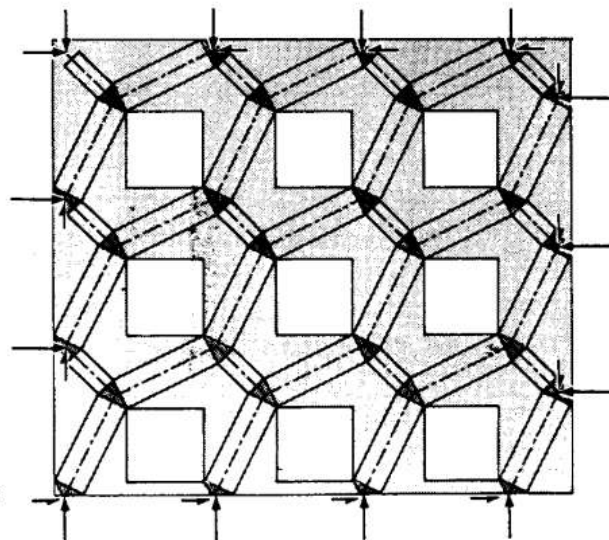
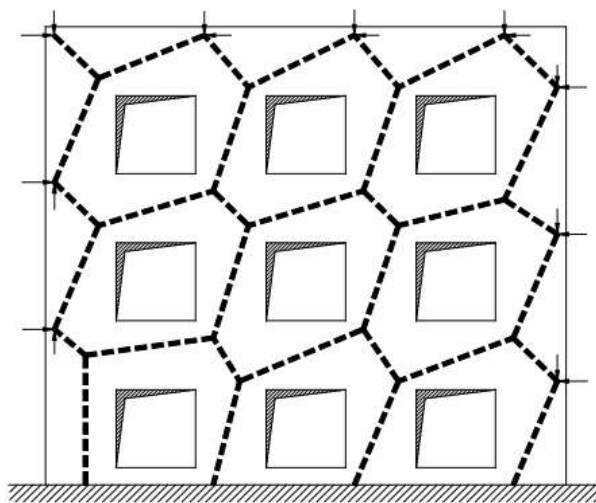


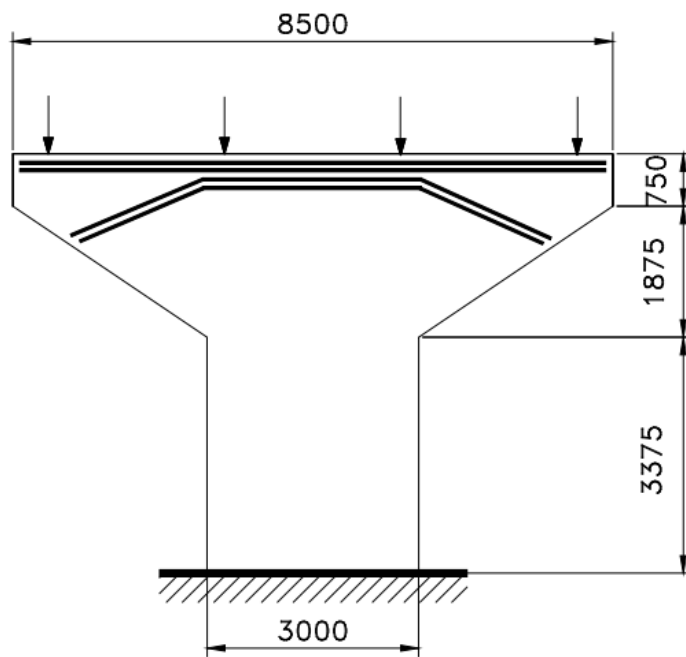
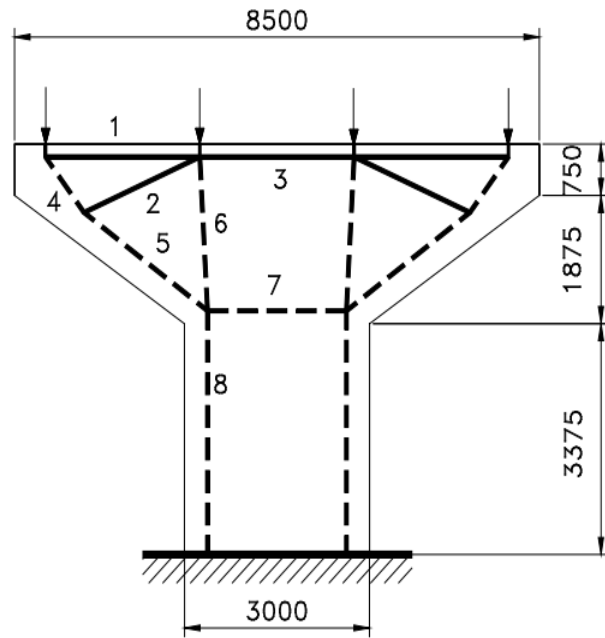
(c) Strut-and-tie model

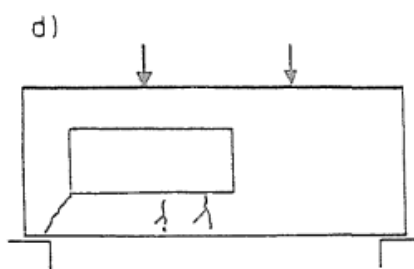
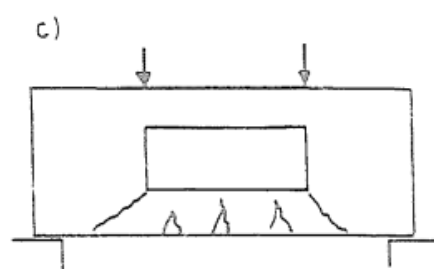
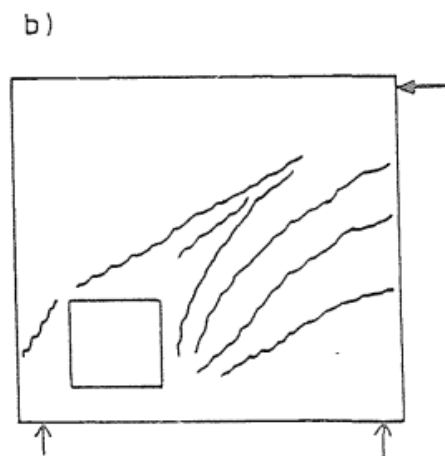
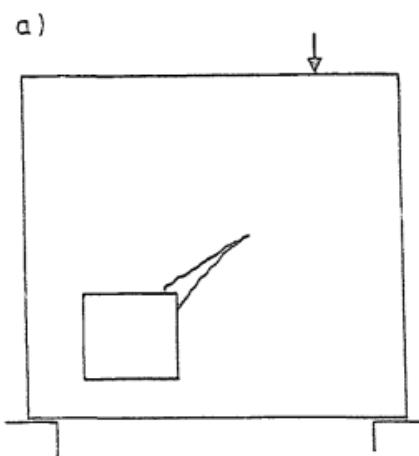


(d) Reinforcement

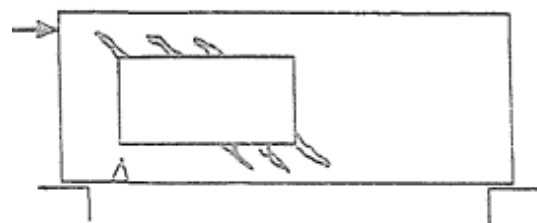
Interior beam-column connection

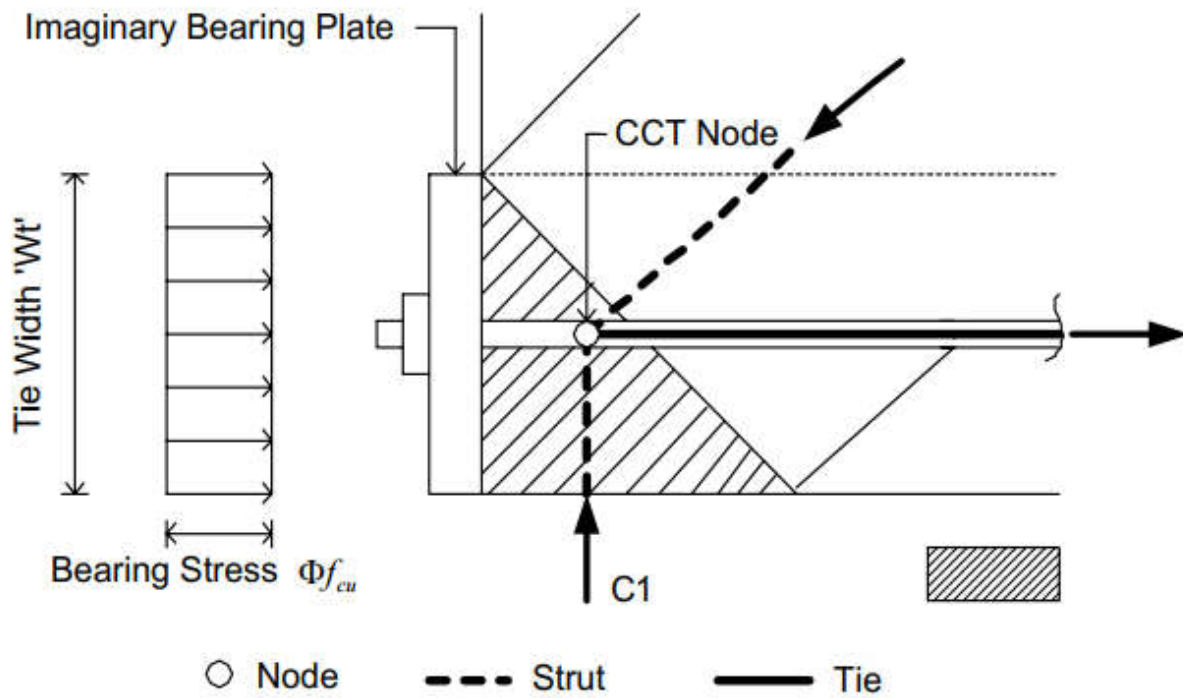
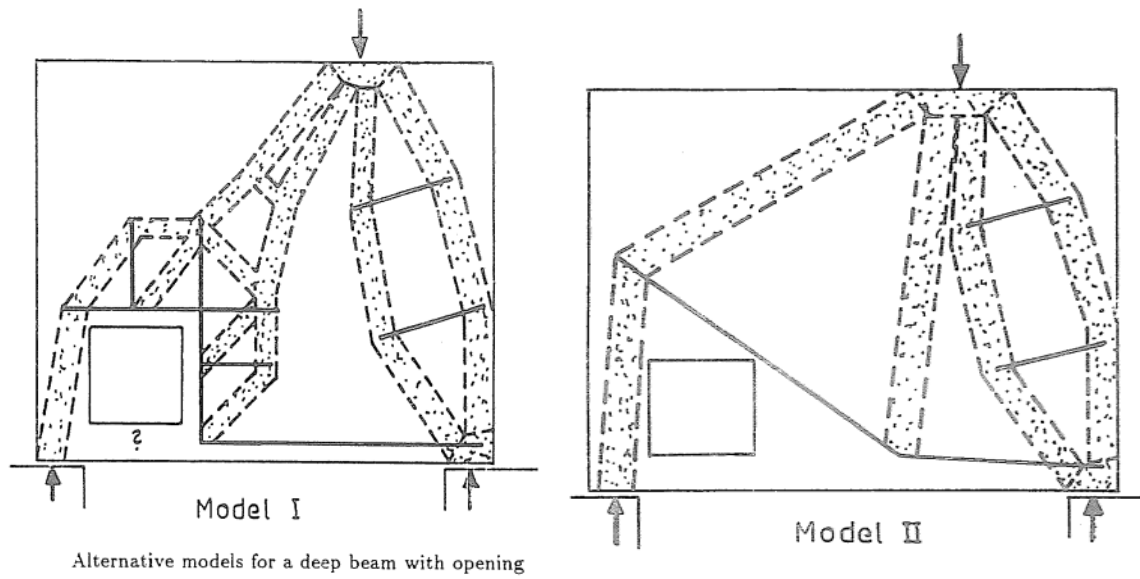




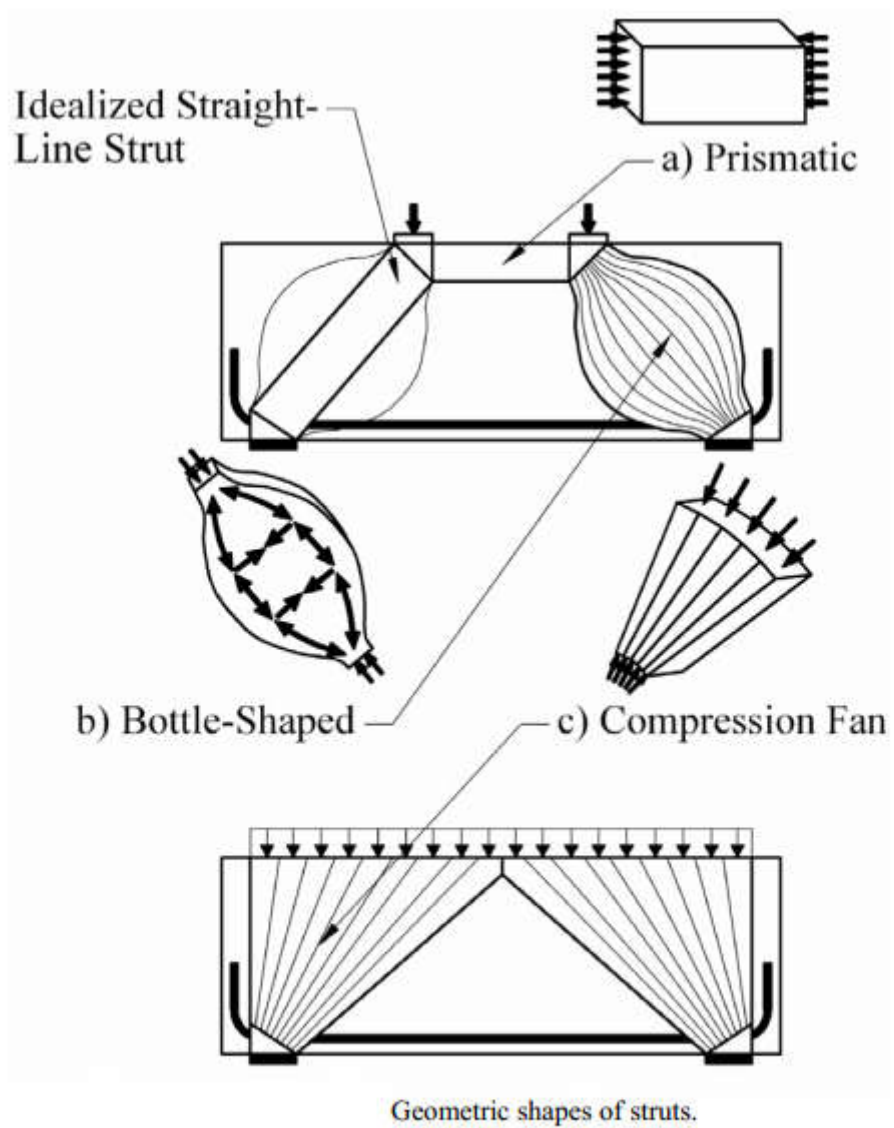


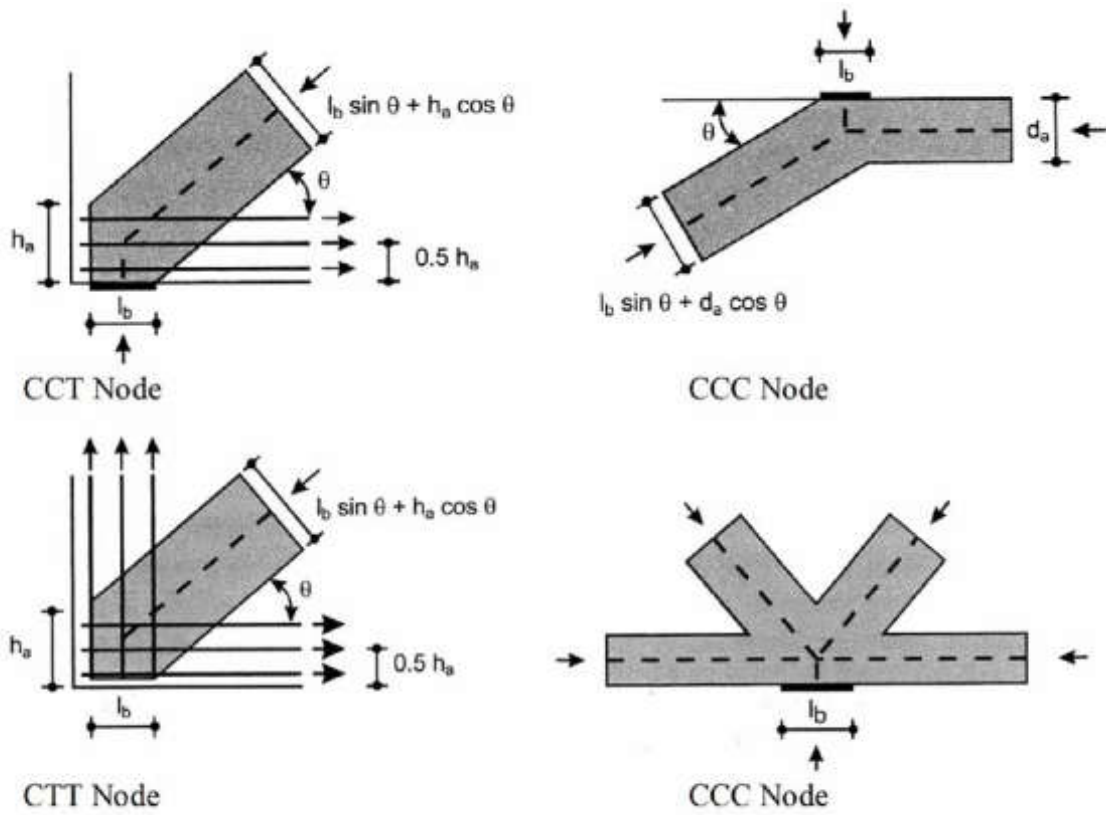
e) Cracks around openings





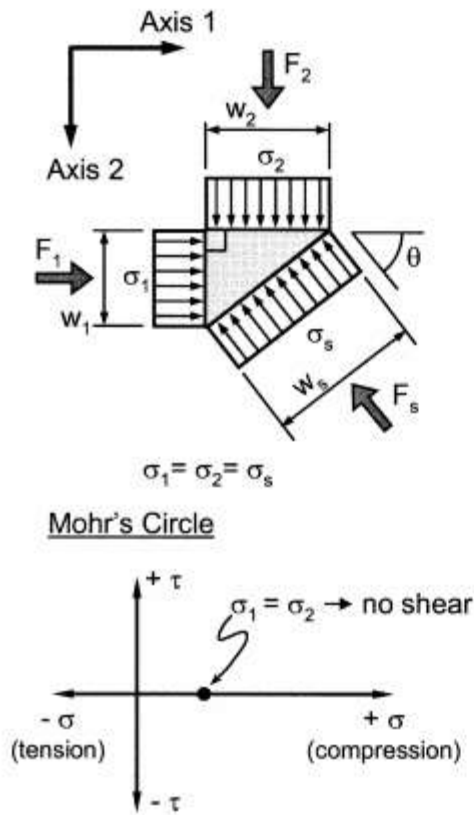
Tie width in a CCT node



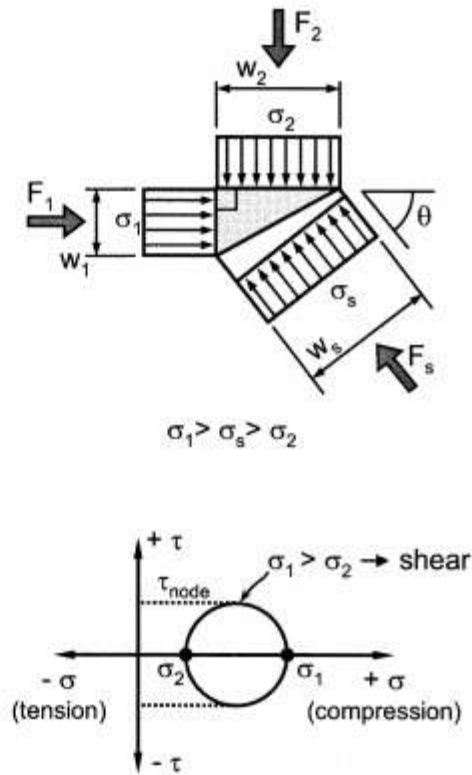


Types of strut-and-tie model nodes (Mitchell et al. 2004).

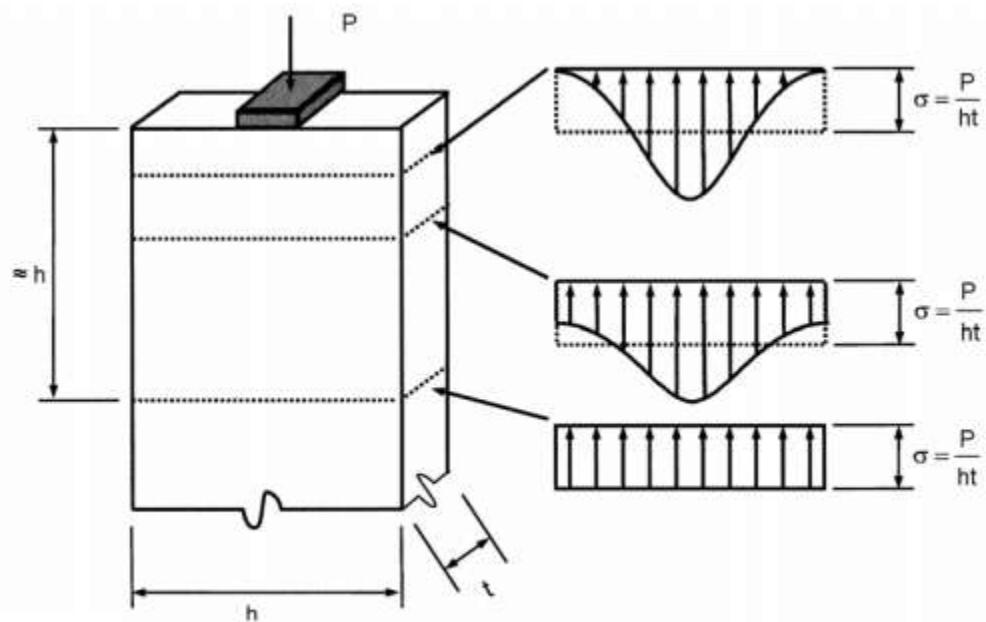
i. Hydrostatic Node



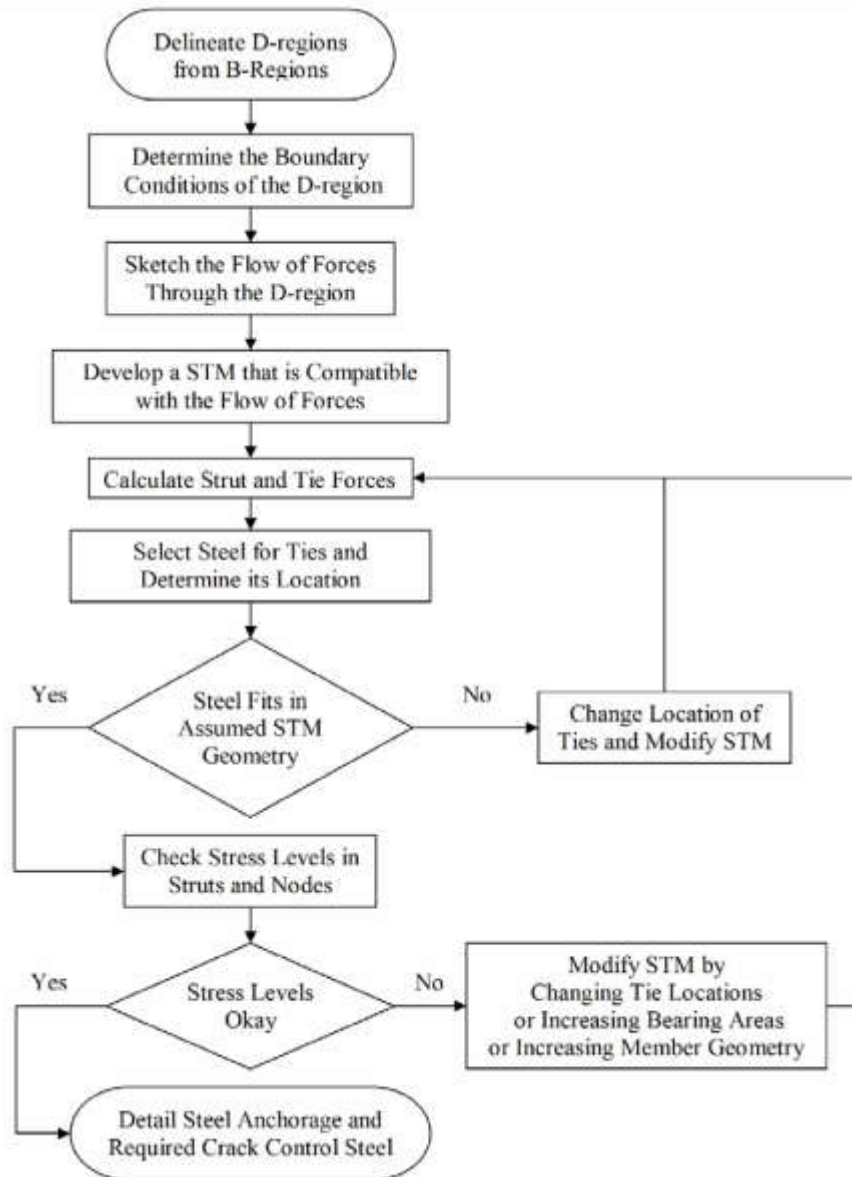
ii. Non-Hydrostatic Node

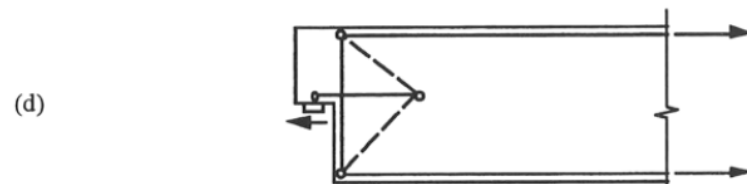
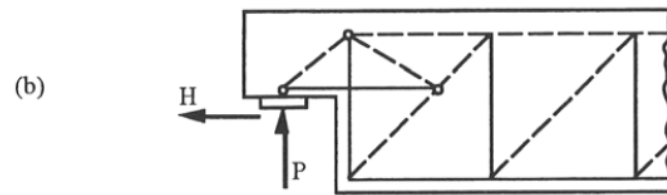
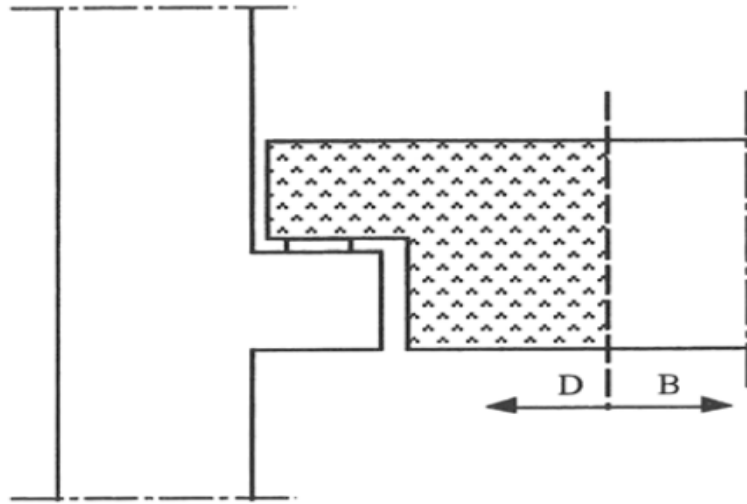


States of stress in hydrostatic and non-hydrostatic nodes (Brown et al. 2006).



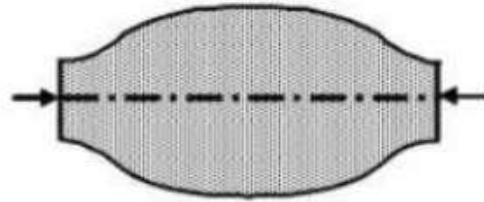
St. Venant's principle (Brown et al. 2006).



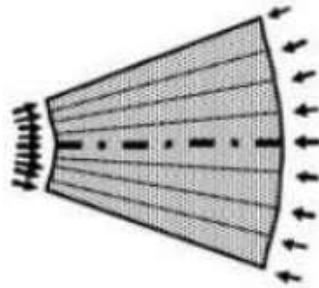




(a) Prism



(b) Bottle



(c) Fan

Different types of struts