کانکریت متشنج قبلی

Pre-stressed Concrete

انجنیر نادر پیشتاز

فهرست مطالب: **صفحه**

پیش گفتار	2
کانکریت متشنج قبلی (Pre-stressed Concrete) چه است؟	4
روش پری تنشند (Pre- tensioned Method)	5
روش پوست تنشننگ (Post Tensioning Method)	8
قاعدهٔ بنیادی دیزاین پری سترس	12
معادلـه اساسی محاسبات پری سترس	14
جدول تشنجات مجاز(Allowable Stress) مطابق ACI-318-77	16
تشنجات مجازکیبل پری سترس(Strand Allowable Stress) مطابق ACI-318-77	17
روش عمومی دیزاین عناصرانحنائی پری سترس	21
مثال دیزاین یک بیم	22
دریافت دارائی های مقطع بیم	24
دریافت مومنت ها و تشنجات درانساج پائینی بیم	27
دریافت تشنجات ضروری و لازم	28
محاسبه تشنجات دروقت انتقال قوه های پری سترس	31
محاسبه تشنجات تحت عمل بارمؤثره (Service Load)	32
ارزیابی بیم پری سترس تحت عمل بارهای فکتورشده (Ultimate Load)	34
محاسبه برش (Shear)	36
محاسبات خمیده گی (Deflection)	42
یاد داشت ها و علامه گذاری سمبول ها	49
زیرنوشته های سمبول ها	50
سرنوشته های سمبول ها	51

پیشگفتار

تاریخ قدیمی ترین تفکراستفادهٔ کانکریت متشنج قبلی[1] (Pre-stressed Concrete) معلوم نیست. برای اولین باردرسال 1886 مفکورهٔ کاربرد پری سترس درکانکریت درایالات متحدهٔ امریکا مطرح گردید ولی درعمل مورد موفقیت خاص قرارنگرفت. درهمین سال ، پی اچ جکسن (P. H. Jackson) انجنیر ساختمانی ازسانفرانسسکو سعی کرد تا صلاحیت یا اجازهٔ استفاده میله ها فلزی را جهت بوجود آوردن یک سلب طویل ازیک تعداد بلاک های میان خالی کانکریتی پریکست بدست آورد و در جهت توسعهٔ این روش آزمایش های را هم انجام داد وآنرا به ثبت رسانید . دوسال بعد ترازآن درسال Civil Engineer1888 دبلیو دوهرنگ جرمنی (C.E.W. Doehring) کاربرد آهن کانکریت را با استفاده از فلز کش شده درکانکریت قبل ازبارگذاری به ثبت رسانید. ولی هیچ کدام از این دو متود بنا به از دست دادن قوهٔ پری سترسد ازاثرخزیدن و یا انقباض (جمع شده گی) کانکریت وهم شُل شدن میله های آهنی با مقاومت پائین به موفقیت نه انجامید.

بعدها بنا به مطالعات بیشتری که صورت گرفت بالاخره درسال 1930 اولین بارانجنیرفرانسوی بنام یوجین فرزنیت (Eugene Freysssinet) آنرا به صورت عملی مورد استفاده قرارداد ، اما تا سال های بعد از جنگ جهانی دوم توسعهٔ قابل ملاحظهٔ دراین ساحه رونما نگردید. بعد؛ متعاقب دوران کمبود شدید مواد دراروپای بعد از جنگ دوم جهانی ، یوجین فرزنیت وهمکارانش امکان استفاده این روش را دوباره پی گیری نموده وبعد از آزمایشات زیاد موفق به طرزاستفاده وتوسعهٔ دیزاین و ساختمان آن گردیدند. و بالاخره، بعد از دوران تخریبی جنگ جهانی دوم قدم های سریع تری مخصوصاً در دهه 1950 برداشته شد. درایالات متحدهٔ امریکا درسال 1951 برای اولین بار درایالت واشنگتن دوبرادربنام های تام اندرسن و آرت اندرسن کمپنی کانکریت تکنالوجی را به حیث اولین موسسه دیزاین و تولید پری سترسد کانکریت اسا س گذاشتند. درسال 1981فرصتی میسرگردید تا اینجانب امتیازاستخدام رادراین موسسه حاصل نمایم.

متذکرباید شد که این روش بخاطراهمیت اقتصادی و سرعت ساختمانی، درایالات متحده امریکاخیلی مورد توجه واستفادهٔ موثر به یک سطح متفاوت تر از اروپا قرار گرفت و زمینهٔ سرعت ساختمان پروژهای زیربنائی را هرچه بیشتر فراهم نمود. هنوزهم تا زمان معاصر، تمام توجه به اهمیت پری کست وپری سترسد که با تولید سریع و انبوه جهت صرفه جوی عظیم نیروی کار ، مواد و زمان صورت می گیرد معطوف بوده وعناصر ساختمانی پریکست- پری سترسد یا بصورت بخشی از ساختمان یا تمام ساختمان مورد استفاده قرارمی گیرند. معمولی ترین آنها : گادرهای دارای وایه های متوسط و طویل ، فرش ها ، پوشش ها و دیوارها و غیره عناصرابتکاری دیگربرای ساختمان های خاص می باشند.

درحالیکه دروطن عزیزما نیروی کار کمبود نیست اما قیمت مواد همواره بلند رفته و محدویت های درمورد منابع آنها بوجود می آید، بنابراین تحت چنین شرایطی اگرمهندسین وانجنیران بتوانند استفادهٔ بیشتری ازعناصر پری کست - پری سترسد کانکریت رامورد توجه قرارداده ودراین بخش اقدام به تشبثات درسکتور خصوصی برای ایجاد مؤسسات تولیدی نمایند، مطمین ام هردوفواید ساختمانی واقتصادی آن محسوس خواهد شد.

دراین رساله، ازبحث وسیع پری سترسد کانکریت، کوشش گردیده تا مختصری ازموضوع، به ساده ترین شیوه که توانائی آنرا داشتم ارائه گردد.امیدوارم ترجمهٔ بعضی اصطلاحات تخنیکی معمول به زبان دری که بنا به دوری تقریباً 40 سالهٔ من ازوطن ازآنها بی اطلاع ام دراینجا موجه باشند، درغیرآن مرهون رهنمائی های جامعه انجنیران خواهم بود تا اصلاحاتی درنشردوم این رساله صورت گیرد. امیدوارم دررفع نقایص این رساله مرا یاری نمائید، خیلی قدردان خواهم بود تا نظریات اصلاحی خویش را به ایمل modeer1@hotmail.com ارسال فرمائید.

جهت جلوگیری ازحجیم شدن این رساله درپهلوی تشریح وتوضیح تئوری و کاربرد شیوه پری سترس تنها به یک مثال دیزاین گادریا بیم پری سترسد اکتفا کرده ام. دررساله بعدی ، مثال های از دیزاین های سلب های جوف دارکه بنام Hollow core یا Voided Slab یاد میشوند، پایه ها ودیوارها و همچنان درمورد کاربرد و شیوه پوست تنشننگ (post-tensioning) بحث خواهم نمود.

برای نوشتن وتدوین این رساله ازکُدهای امریکا مانند:

American Concrete Institute (ACI Code)

United Building Code (UBC Code)

Precast and Pre-stressed Concrete Institute (PCI) Design Handbook

و Design of Pre-stressed concrete By: Arthur H. Nelson

استفاده شده وتمام محاسبات به سیستم US customary یا سیستم امپریال می باشد بسیارسعی نموده ام تا تمام سمبول ها ، علامات ، نشانه ها وواژه ها مطابقت به کُود های فوق الذکرداشته باشند. لطفاً در ختم این رساله به لست یادداشت ها ، علامه گذاری سمبول ها ، زیرنوشته ها و سرنوشته های سمبول ها مراجعه فرمائید. امیدوارم این رساله بتواند جایگاهی درجمع تألیفات دیگرهم مسلکان یافته وشایسته گی توجه و استفاده راداشته باشد.

نادرپیشتاز - سیاتل واشنگتن

جنوری ۱ - ۲۰۲۰

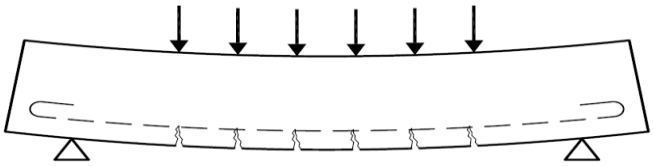
(1) درمتن این رساله به جای جملهٔ "کانکریت متشنج قبلی" ازترکیب واژه های "پری سترسد کانکریت" و عوض جملهٔ " متشنج بعدی" ازترکیب واژه های "پوست تن شننگ" استفاده خواهد شد.

کانکریت متشنج قبلی

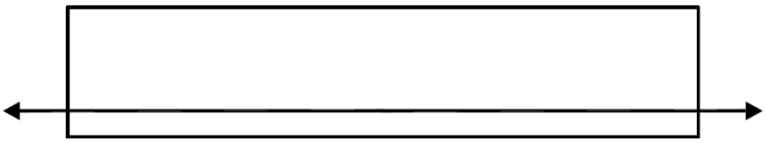
Pre-stressed Concrete

کانکریت متشنج قبلی یا پری سترسد کانکریت چه است؟

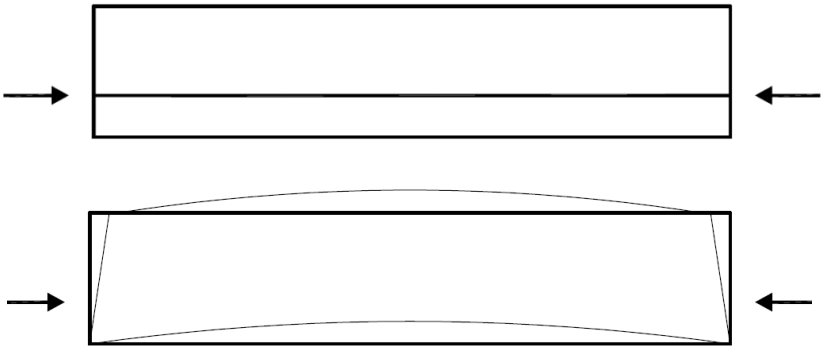
پری سترسد کانکریت (Pre-stressed Concrete) روشی است که به منظوربرطرف کردن ضعف کانکریت درمقاومت کششی برای عناصری که ازآهن کانکریت معمولی قابل ساخت نباشند استفاده می گردد. به عباره دیگر پری سترسد عبارت از بارگزاری یک عنصرساختمانی قبل از بارگذاری بارهای عامل (دیزاین) درجهت توسعه توانائی آن دربرابر مقاومت کششی می باشد. این عناصرمیتواند بیم ها ، فرش ها ، دیوارهای بلند ،پایه ها، گادرهای پل ها و دیگرعناصرکانکریتی ساختمان های مخصوص باشند. دراشکال آتی بصورت ساده ومختصردلیل و کاربرد این روش نشان داده شده است:



شکل 1 - ایجاد درزها دریک بیم سادهٔ آهن کانکریتی تحت عمل بارهای عمودی

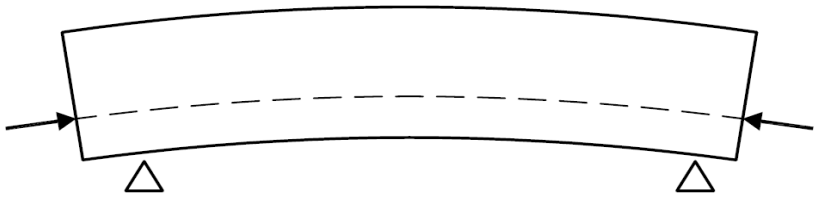


شکل 2- تعبیه کیبل ها وکاربرد قوه کششی - پری سترس قبل ازریختن کانکریت دریک بیم پری کست

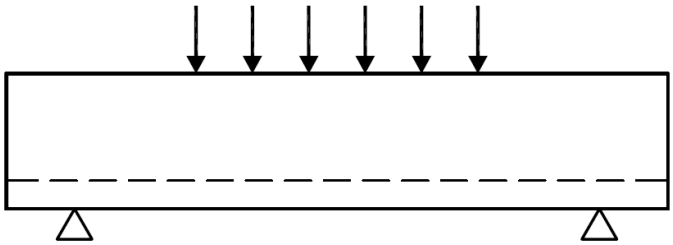


شکل 3- قوه های پری سترسد بعد ازریختن کانکریت رها گردیده وسبب انحنای مثبت می گردند.

به کاربردن روش (پری سترسد) نشاندهنده آنست که سترس (Stress) یا تنش (تشنجات) داخلی قبل ازعمل بارهای عمودی (Gravity) ودیگربارهای بالائی دریک عنصر به وجود آورده می شود. اجرای روش پری سترسد کانکریت عمل کشش کیبل های فولادی (شکل 2) و بعد رهائی آنها مقابل کانکریت سخت شده (شکل 3) می باشد که درنتیجه کانکریت فشرده شده و سبب جلوگیری یا تقلیل اصغری درزها درکانکریت تحت عمل بارهای واردهٔ خارجی می گردد. زمانیکه یک بیم پری سترسد درموقعیت ساختمانی آن نصب یا منتاژ می گردد حالات اشکال ذیل را دارا می باشد:



شکل 4- بیم پری سترسد (متشنج قبلی) قبل ازعمل بارهای عمودی.



شکل 5- بیم پری سترسد (متشنج قبلی) بعد ازعمل بارهای عمودی

باید تذکر داد که درهردو روش؛ آهن کانکریت معمولی ویا پری سترسد کانکریت، عناصرساختمانی باید قابلیت ضرورت های لازم و حتمی مقاومت (Strength)، وقابلیت استفاده (Serviceability) را برآورده ساخته بتوانند. درعناصر کانکریتی این اهداف با انتخاب عمق (ارتفاع) مقطع عنصربه تناسب وایه آن برآورده شده و محاسبات بیشترتشنجات صورت نمی گیرد. دراین حالت انتخاب مقطع باعمق یا ارتفاع زیادترسبب تزئید وزن خود گادریا بیم گردیده و محدودیت های را درانتخاب طول وایه بوجود می آورد. اما درعناصرپری سترسد کانکریت خمیدگی عنصرتوسط هردو مشخصات ؛ (دارائی های) مقطع و قوه های پری سترس کنترول می گردد. وباید متذکرشد که محاسبات مقاومت (Strength) درهردوحالت ؛ هم درصورت انتخاب عنصرآهن کانکریت عادی ویا هم درپری سترسد کانکریت لازمی می باشد.

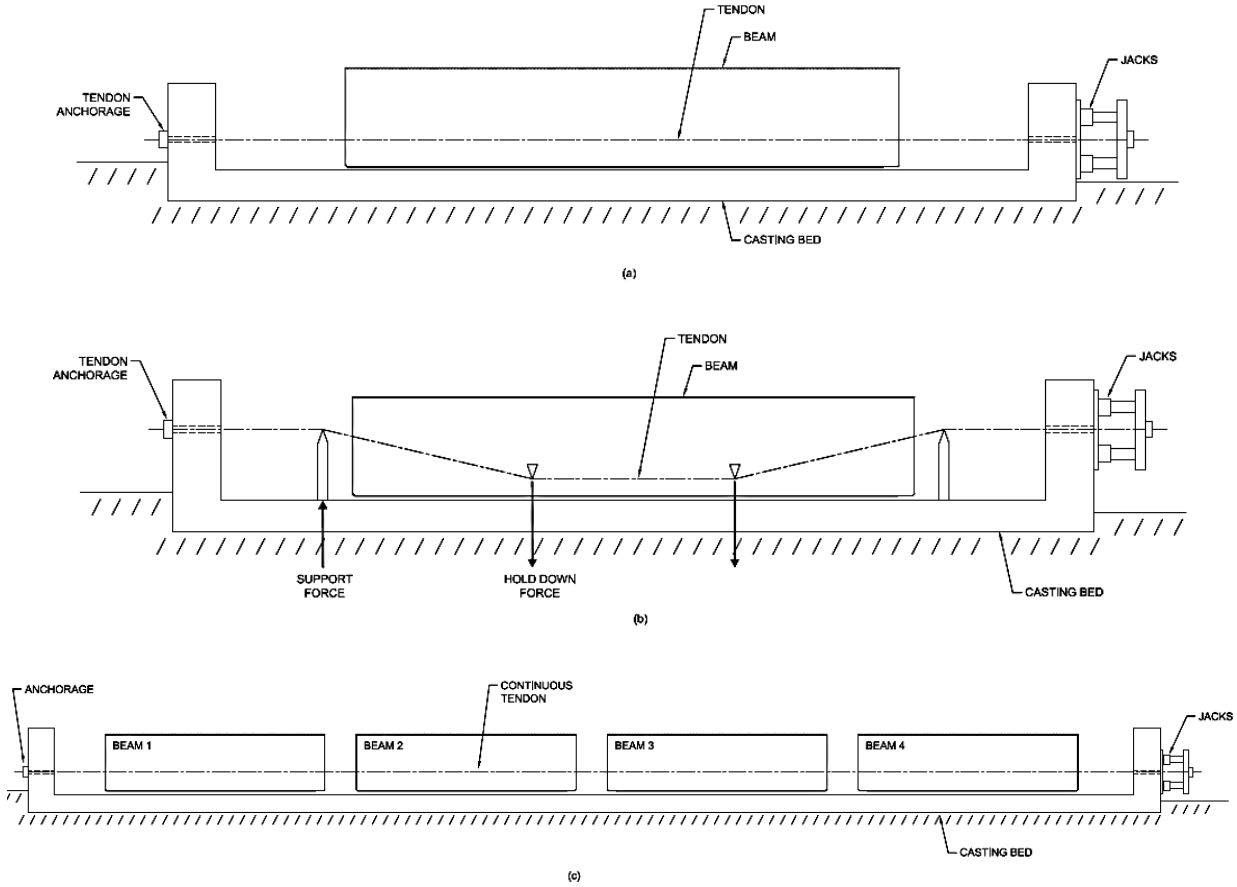
دو متود یا طریقهٔ پری سترسنگ (Pre-stressing) وجود دارد:

طریقهٔ اول: پری تنشند (Pre-tensioned method) نامیده می شود که دراین متود، کیبل های فلزی- فولادی درموقعیت دیزاین شده عنصربین دو تیغه (Bulkhead) یا (Abutment) یا دیواره های دو انجام بستر تولیدی تعبیه ونصب می گردند (شکل 6)، این دیواره های انجام بسترتولیدی زمینهٔ (مهارکردن) یا (Anchor) کیبل ها رامهیا می سازند طوریکه در یک انجام، کیبل ها محکم یا (Anchor) گردیده، ودرانجام دیگرکیبل های محکم شده دریک پلیت توسط جک های هایدرولیکی

(Hydraulic Jacks) تنش یا کشش داده می شوند. بعد ازاجرای عمل کشش، نصب سیخ بندی های اضافی، جاگذاری و بسته کاری های لازمی دیگرانجام یافته وقالب ها نصب وتحکیم میگردند، و بعد کانکریت درقالب واطراف کیبل ها ریختانده می شود. البته زمانیکه کانکریت سخت گردید ومقاومت لازم خود را مطابق دیزاین حاصل نمود کیبل های کش شده رها میگردند که درنتیجهٔ آن قوای کششی کیبل ها به کانکریت انتقال نموده وسبب ایجاد فشاردرکانکریت می گردد ونتیجتاً توانائی کانکریت را درکشش بالا می برد. عملیه رهائی کیبل ها هم توسط جک های هایدرولیکی با احتیاط لازم بصورت تدریجی صورت میگیرد تاازمجروح شدن کارگران وصدمات درعنصر وتجهیزات پری سترس جلوگیری بعمل آید.

درصنایع پری سترسد کانکریت، ازمخلوط کانکریت های دارای اضافه کنندهٔ های سوپر پلاستیسایزر (superplasticizer)، تقلیل دهنده های آب(water reducer) وبعضاً فلای اش(flu ash) یا سیلیکا فیوم (silica fume) استفاده می گردند تا قابلیت سریع متراکم شدن وسخت شدن را داشته باشند.

قابل تذکراست که انجنیردیزاینرباید با تمام خصوصیات ساختمانی وتولیدی چنین عناصرآشنا بوده وبا مشاورهٔ خیلی نزدیک انجنیرتولید کننده، مراحل دیزاین را انجام دهد.



شکل 6

درشکل بالا انجام بسترتولیدی که کیبل ها درآن محکم می شوند بنام انجام مرده (dead end) وانجام دیگر که درآن جک های هایدرولیکی نصب است وعملیهٔ تنش توسط آن انجام داده می شود بنام (live end) یا

انجام زنده یاد می شوند. درجریان تنش باید تمام کیبل ها آزادانه وعاری ازبندش کش شده و سبب صدمه درقالب یا بسترتولیدی نشوند. درزمان کشش کردن کیبل ها، طول کشیده شده یا طویل شدن آنها وهمچنان قوه کشش به دقت اندازه گیری می شوند.همچنان درلحظهٔ رهائی قوه های پری سترس ،عنصرتولید شده بالای بسترتولیدی به سمت انجام مردهٔ بستر لغزش می نماید وبائیست مقداراین لغزش نظر به طول کیبل در بسترتولیدی محاسبه وپیش بینی گردد.

درشکل 6، رسم (a) نشان دهندهٔ تنش کیبل های مستقیم دریک بیم است. این شیوه میتواند با قوه های پری سترس مرکزی ویا باعن المرکزیت ثابت باشد. رسم (b) کیبل هاراباعن المرکزیت متغیرنشان میدهد، و رسم (c) تولید چندین عنصرمشابه را دریک بسترتولیدی نمایش می دهد.

σ = Elongation ،(کشیده شدن) یا طویل شدن یک کیبل پری سترس ازفورمول ذیل دریافت می گردد:

$$\text{Elongation} = \sigma = \frac{P\,l}{A\,E}$$

دراینجا :

P - قوه کششی یا Jacking force ومعمولاً برای کیبل با قطر نیم انچ ، 31 kips = 31,000 lb است.

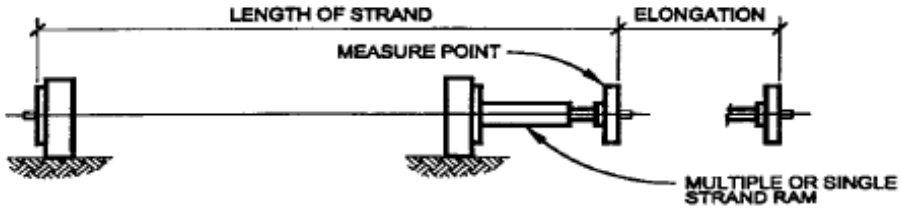
l - طول کیبل از نقاط محکم شده (شکل7) دیده شود.

A - مساحت مقطع کیبل که برای کیبل با قطر نیم انچ مساوی به $0.153\ in^2$ است.

E - مدول الستیکیت کیبل که به طوراوسط برای کیبل با قطرنیم انچ مساوی به 28,600 ksi می باشد.

مثال: طویل شدن یک کیبل نیم انچ پری سترس برای طول 200 ft دریافت گردد:

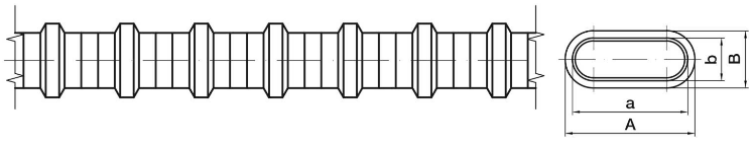
$$\text{Elongation} = \sigma = \frac{P\,l}{A\,E} = \frac{31x\,200x12}{0.153x28{,}600} = 17.0\ in$$



شکل 7

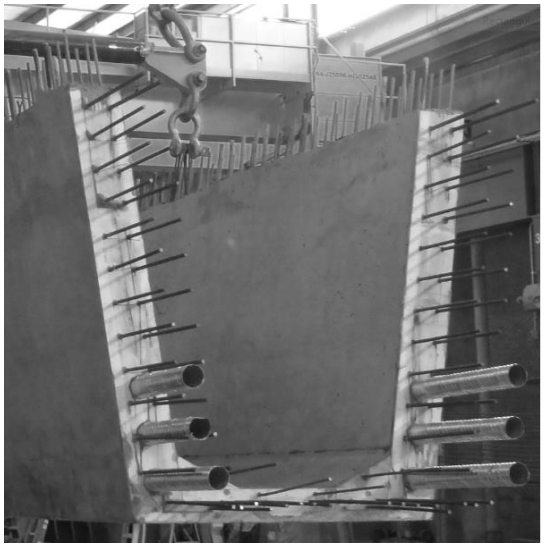
طریقهٔ دوم: پوست تن شننگ یا (Post Tensioning Method) نامیده میشود.

درین روش قبل ازریختاندن کانکریت دریک عنصر پری کست یا یک ریخت ساحوی لوله های قابل انعطاف پلاستیکی یا آهنی رخ دار یا موج دار(corrugated) درعنصر جا داده شده وسبب تولید خلا یا خلا های طولانی درکانکریت برای قراردادن بعدی کیبل های قابل کشش پری سترسد می گردند، به اشکال وتصاویر ذیل برای مواد و کاربرد این روش مراجعه شود.



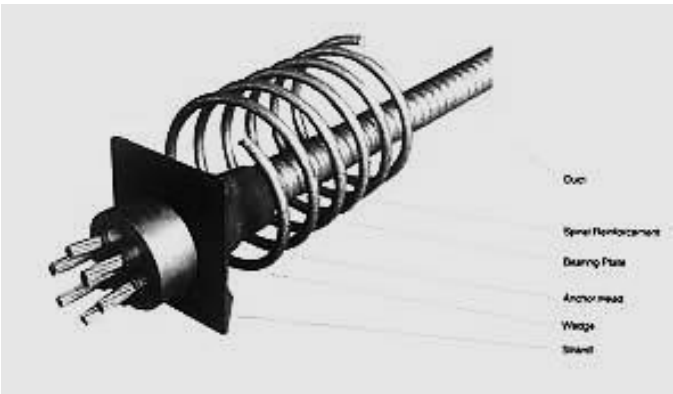
لوله های که جهت ایجاد خلاها درعناصرپوست تن شننگ استفاده می شوند بنام PT Duct یا لوله های پی تی یاد می شوند. اینها با مقطع های هموارمانند شکل بالا از مواد پلاستیکی و یا با مقطع های دایره وی ازمواد فلزی چنانچه درتصویر ذیل نشان داده شده است میسرمی باشند. سایزو پروفایل قراردادن لوله های پی تی دریک عنصرپوست تنشن توسط انجنیر دیزاینرمشخص می شود.

در2 تصویر پائینی جا دادن لوله هادریک عنصر نشان داده شده است.

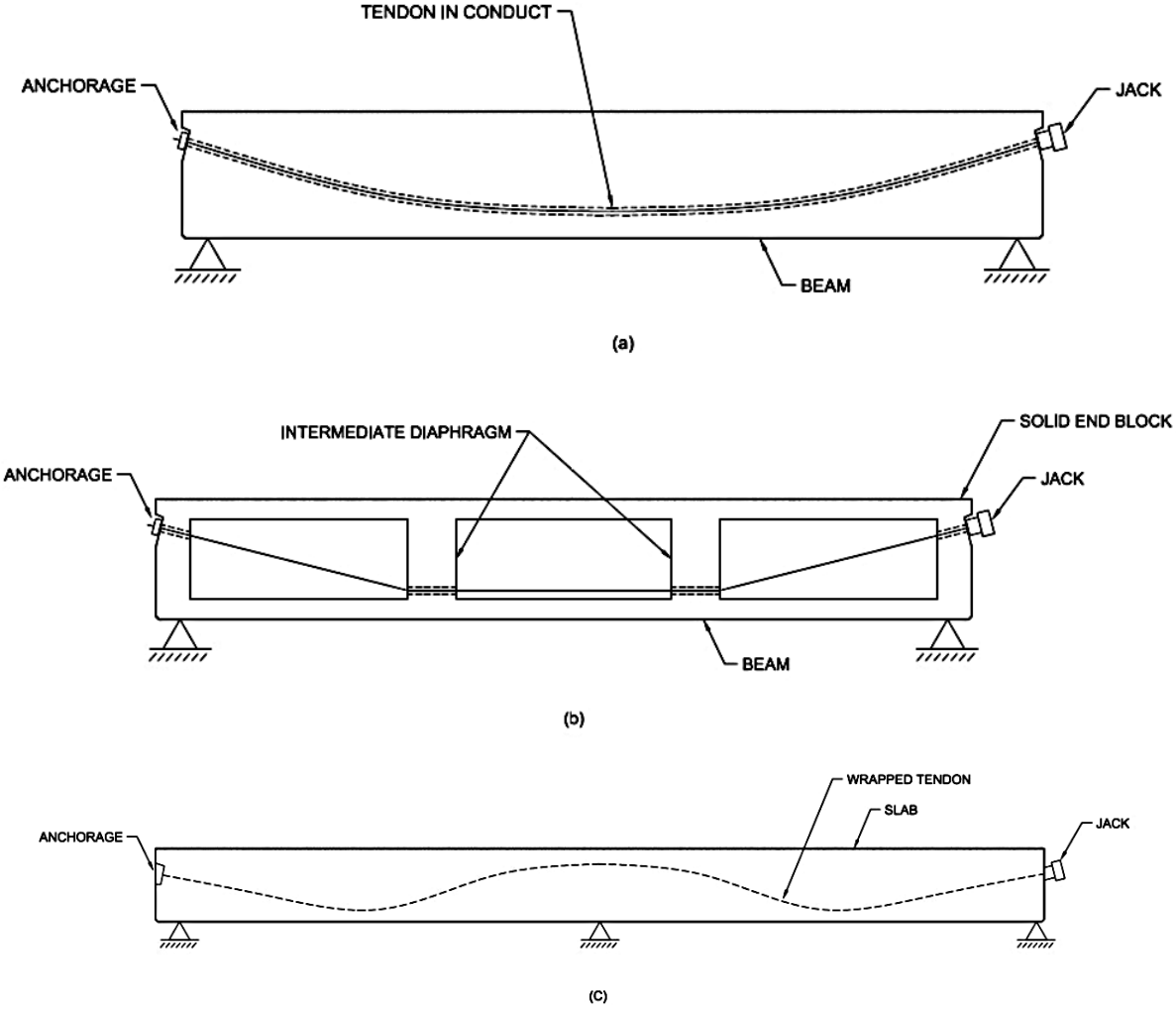


درروش پوست تن شننگ ، اول لوله های انعطاف پذیرهمراه با سیخ بندی ودیگرتجهیزات لازم مطابق دیزاین درقالب قرارداده شده وبعد کانکریت ریخته میشود. زمانیکه کانکریت سخت گردید ومقاومت لازم خود را مطابق دیزاین حاصل نمود، کیبل های پری سترس یا سیخ ها یا میله های قابل کش شدن که بنام solid steel rods یاد میشوند دربین لوله هاجاداده شده ودرانجام های عنصرپری کست یا عنصریک ریخت ساحوی محکم (anchor) یا مهار می گردند. بعد این کیبل ها یا میله ها توسط جک های هایدرولیکی (hydraulic jacks) مقابل کانکریت کش شده و کانکریت فشرده می شود(به شکل 8 مراجعه شود).

برای مهاریا محکم نمودن کیبل ها درعناصر پوست تنشن معمولاً ازبلاک های تولید شدۀ فلزی (فولادی) که بنام PT Socket یاد می شوند استفاده می شود، بعضی مثال های این بلاک ها درتصاویرذیل نشان داده شده است. بلاک های مشابه درهردوانجام یک عنصر نصب می شود ولی عملیه کشش کیبل ها ازیک انجام صورت می گیرد.



Henan Prestressing Equipment Co., Ltd.
CNAS
CE
CQC
IAF


TENDON IN CONDUCT
ANCHORAGE
JACK
BEAM
(a)
INTERMEDIATE DIAPHRAGM
SOLID END BLOCK
ANCHORAGE
JACK
BEAM
(b)
WRAPPED TENDON
SLAB
ANCHORAGE
JACK
(C)

شکل 8

درشکل 8، طریقه های پوست تن شننگ نشان داده شده است: رسم (a) یک بیم را با جاگذاری لوله های میان خالی درکانکریت وبعد قراردادن کیبل ها را درآن نشان میدهد. رسم (b) گذاشتن جوف های بزرگ را دریک بیم که بین آنها دایافراگم های وسطی کانکریتی قراردارند توضیح داده است ، و رسم (c) یک سلب مسلسل را با کیبل های که با پلاستیک پیچانده شده تا ازچسپش با کانکریت جلوگیری شود نشان می دهد. همچنان برای این منظورازلوله های پلاستیکی میان خالی که قطرآنها کمی زیادترازقطرکیبل باشد نیزاستفاده می شود.

طوریکه دیده می شود درهردوطریقهٔ متذکرهٔ فوق بوجود آوردن تشنجات داخلی درعنصر قبل ازعمل بارهای عامل مرده و زنده صورت می گیرد ،واین اکثراً هم پیوندی با متود ساختمانی عناصرپری کست میداشته باشد. پس میتوان گفت که اغلباً متود پری سترسنگ وپوست تنشننگ وقتی استفاده میشود که عناصر پری کست باشد، ودرجای دیگری غیرازموقیعت آخری آنها ساخته شوند.

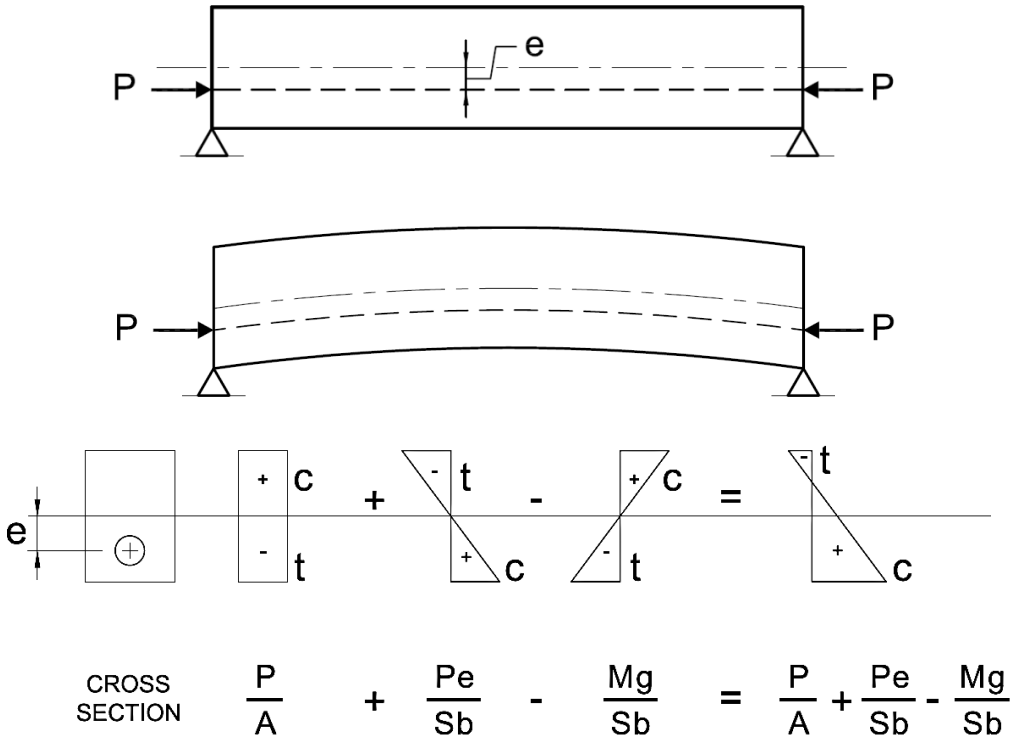
زیادترین شیوهٔ پوست تن شننگ به طریقهٔ (segmental) یا قراردادن قطعات متعدد پری کست پی هم درامتداد وایه به منظور بدست آوردن یک یا چندین وایهٔ طویل استفاده می شود. باید متذکرشد که بعداز کش کردن کیبل های داخل لوله ها، مخلوط مایعی از سمنت وآب و مخلوط کننده های دیگرکه سبب انبساط مخلوط می گردند داخل لوله ها پمپ می شود.

بعضاً پوست تن شننگ میتواند درهردومتود ساختمانی پرکست ویا یک ریخت کارگرفته شودکه یک مثال سادهٔ کارگیری آن درشرایط یک ریخت؛ متشنج ساختن سلب های یک ریخت درساحه ساختمانی میباشد به رسم (c) شکل 8 مراجعه شود.

نتیجه مهمی که ازایجاد تشنجات داخلی دریک عنصربه وجود می آید آن است که تشنجات یا سترس در عنصرپری سترسد متناسب به بارعامل نمی باشد. با مقایسه؛ اکثراً اتفاق می افتد که بلندترین تشنجات دروقت رهائی قوه های پری سترس بزرگتراز تشنجاتی است که عنصر تحت عمل کامل بارهای دیزاین آنرا متحمل می شود، یا به عباره دیگرسترس کلی ازاثربار دیزاین پائین ترمی باشد، واین درمغایرت با عناصر چوبی ، فلزی، و آهن کانکریت معمولی می باشد که سترس متناسب به باراست. به هرحال ، باید گفت که هرگاه سترس وباردر یک عنصرپرسترسد متنا سب نباشد، ضروراست که محاسبات آن تحت عمل هردوسرویس لود (Service Load) والتیمت لود (Ultimate Load- بارفکتورشده) صورت گیرد.

دراین جا تبصره ای در مورد تبدیل علامه های الجبریک (+) یا (-) ضروری است. معمولاًعلامهٔ الجبری برای تشنج کششی (T) مثبت (+) وبرای تشنجات فشاری (C) منفی (-) می باشد ولی ازآنجائیکه اکثر تشنجات دردیزاین پری سترسد فشاری (C) می باشد، اکثرنویسنده گان علامات الجبری را بصورت معکوس استفاده نموده وتشنجات فشاری رامثبت (C^{+}) وتشنجات کششی را منفی (T^{-}) نشان میدهند. بهترین طریقه که ازاشتباه درمحاسبات دستی جلوگیری شود باید ازحروف C و T برای تشنجات استفاده شوند. اما ناگذیرخواهیم بود تا علامات مثبت ومنفی را درمحاسبات کمپیوتری بکاربریم. قابل تذکراست که تشنجات آهن یا فولادباعلامه مثبت باقی می ماند.

برای وضاحت موضوع درمثال ذیل ، دایاگرام های تشنجات ازاثرعمل قوه های پری سترس را دریک بیم ساده با عن المرکزیت e از محورصفری یا Neutral axis نشان می دهیم.



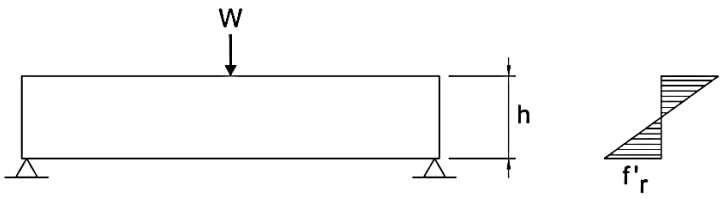
شکل 8

درمعادله بالا؛ S_b مدول پائین مقطع ازمحورو M_g مومنت وزن خود عنصر است.

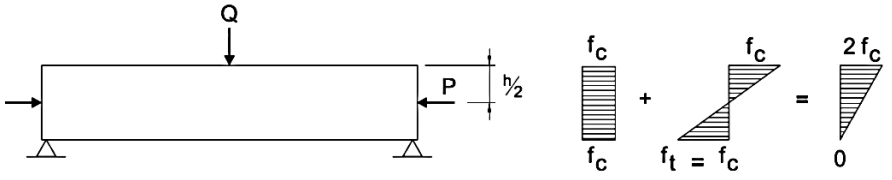
قاعدهٔ بنیادی دیزاین پری سترس:

میدانیم که (flexure) انحنا یا خمیده گی یک بیم ساده موجب کشش درانساج پائینی میشود، ولی استفاده پرس سترس سبب ایجاد تشنجات ابتدائی فشاری درانساج پائینی گردیده، وبعد ازعمل بارهای مختلط خارجی (superimposed loads) ،عمل کششی (tensile) تغییرخورده ودرنتیجه بصورت ابتدائی انساج پائینی بیم درحالت آرمیده گی (relaxation) قبل ازفشار(pre-compression) قرارمی گیرد.

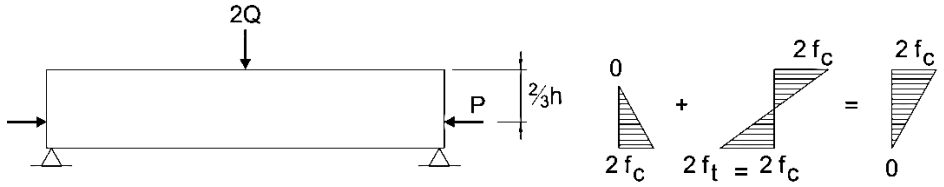
باید گفت که مطابق کُد یک مقدارکم سترس کششی(tensile stress) خالص یا نهائی تحت عمل کلی بارهای مؤثره (full service load) مجازمی باشد.دراشکال ذیل گزینه های مختلف پری سترس دریک بیم سادهٔ دارای مقطع مستطیلی نشان داده شده است:



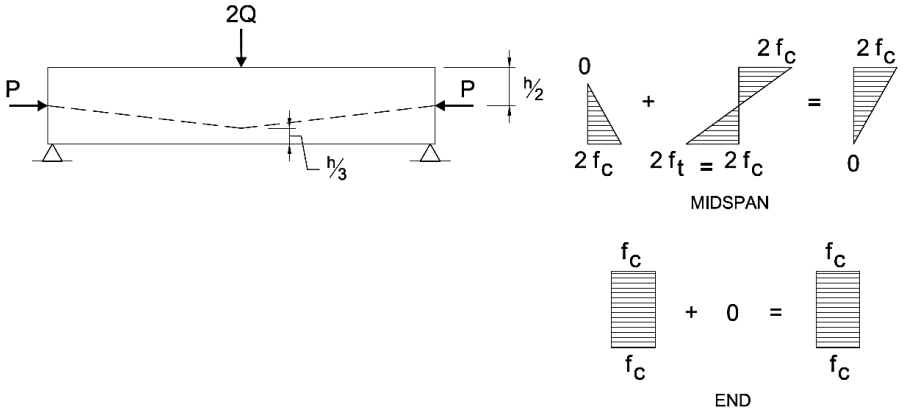
(a) بیم ساده کانکریتی بدون عمل قوهٔ پری سترس.



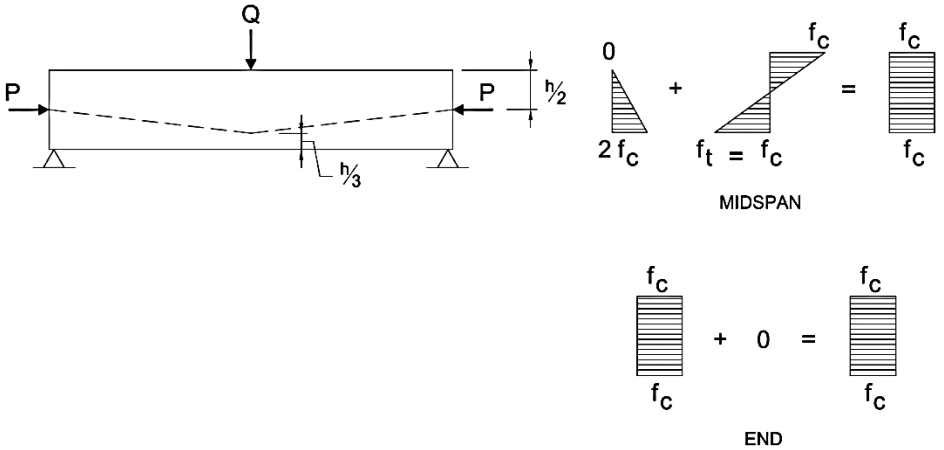
(b) بیم با عمل مرکزی (محوری) قوه پری سترس.



(c) بیم با عمل عن المرکزیت ثابت قوه پری سترس.



(d) بیم با عمل عن المرکزیت متغییر قوه پری سترس.

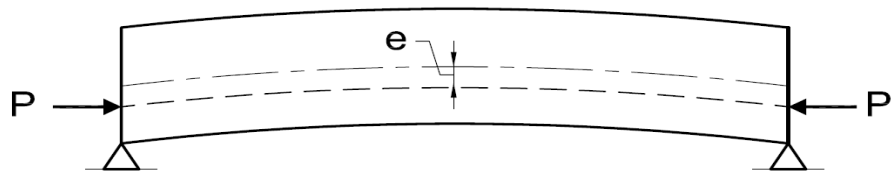


(e) بیم با کاربرد تعادل بارتحت عمل قوه پری سترس با عن المرکزیت متغییر.

شکل 9

در پری سترسد کانکریت ، خمیده گی (deflection) توسط هردوداشته ها: 1- دارائی ها یا مشخصات مقطع عنصرو2- قوهای پری سترس کنترول می شود، بنا برین برای اینکه اطمینان حاصل گردد که توانائي عنصرتحت عمل سرویس لود(service load) یا بارموثرتضمین شده بتواند باید محاسبات تشنجات وخمیده گی (deflection) هردوتحت عمل سروس لود (service load) صورت گیرد.

معادلۀ اساسی محاسبات پری سترس:



شکل 10 تئیوری اساسی

محاسبات تشنجات درانساج پائینی یک عنصر پری سترسد توسط معادله اساسی ذیل صورت می گیرد:

$$\frac{P}{A} + \frac{Pe}{S_b} - \frac{M_g}{S_b} - \frac{M_d}{S_{b\,(c)}} - \frac{M_l}{S_{b\,(c)}} = f_{t\ \ allow} \quad \text{مجاز} \qquad (1)$$

دراین معادله :

P = قوه پری سترس (نهائی بعد از تمام ضایعات، مگرآنکه غیرآن توضیح گردد)

A = مساحت مقطع

e = عن المرکزیت قوه پری سترس از محورمقطع

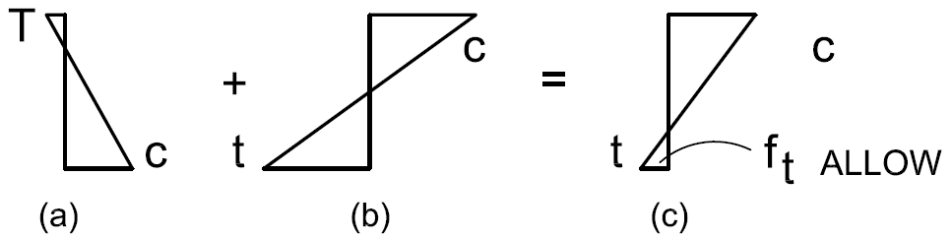
M_g = مومنت وزن خودعنصر(معمولاً برای براشتن عنصرازقالب استفاده می شود)

M_d = مومنت بارهای مرده که بالای عنصرپری سترسد عمل می کنند

M_l = مومنت بارهای زنده

f_t = تشنجات مجاز مطابق UBC و ACI

S_b = مدول پائین مقطع $bottom\ section\ modulus$



تشنجات ازاثرعمل پری سترس وبارهای عامل

در دایاگرام های تشنجات بالا توجه شود:

دایاگرام (a): عبارت از:

$$\frac{P}{A} + \frac{Pe}{S_b} - \frac{M_g}{S_b}$$

ترکیب تشنجات یا تنش ازاثرعمل قوه پری سترس ووزن عنصرمی باشد وخیلی مهم است که این ترکیب بصورت جدا گانه مدنظر گرفته شود. تحلیل فزیکی آن اینست که وقتی قوه های پری سترس درعنصررها می گردند، بیم ازقالب بلند شده وانحنای مثبت بطرف بالا اختیارمی کند ودرنتیجه انساج بالائی درکشش وانساج پائینی درفشار قرارمی گیرند، هم زمان با آن ، ازاثر وزن خود عنصرمومنت انحنائی سبب انحنای منفی بطرف پائین شده و انساج بالائی در فشار و انساج پائینی در کشش قرارمی گیرند، درنتیجه: این دوعمل یکدیگر خود راخنثی می نمایند. باید گفت که نظربه تشخیص انجنیردیزاینر،یک مقدار تشنجات مجازهنوزهم باقی می ماند که دردایاگرام (a) نشان داده شده و آنرادر بخش (b) توضیح میدهیم.

دایاگرام (b): عبارت از:

$$-\frac{M_d}{S_{b\,(c)}} - \frac{M_l}{S_{b\,(c)}}$$

تشنجات یا تنش ازاثربارهای بالائی یا سوپرامپوز(بارهای مرده وزنده) است. در اینجا $S_{b\,(c)}$ مدول پائین مقطع مختلط (composite section) می باشد.

دایاگرام (c): عبارت ازحاصل تمام تشنجات یعنی مقدارتشنجی می باشد که تحت عمل کلی سرویس لود بدست می آید واین تشنجات مجاز($f_{t\ allow}$) نامیده می شود. باید گفت که معمولاً یک مقدار کوچک تشنج کششی تحت عمل کامل بارموثریا (full service load) مجازمی باشد.

معادله (1) برای محاسبات تشنجات یا تنش انساج پائینی عنطر پریسترسد نوشته شده که درکل پروسه دیزاین یک عنطرپری سترسد را کنترول میکند، علاوه ازآن ضروری است که تشنجات وتنش انساج بالائی عنصر نیزباید محاسبه وچک شود، وهمین روش میتواند برای دیزاین بیم ها با وایه های مسلسل نیز بکار برده شود. با تفاوت این که انساج پائینی باید (tension side) یا کششی خوانده شود که درحالت نورمال انساج پائینی وسط وایه می باشد اما انساج بالائی دراتکا ها است.

جدول تشنجات مجاز ($f_{t\ allow}$) عناصرانحنائی پری سترس کانکریت مطابق کُد ACI-318-77:

1- تشنجات درزمان انتقال قوی های پری سترس به کانکریت (قبل ازضایعات پری سترس) نباید اضافه ترازحدود ذیل باشد:	
حد اکثرتشنجات مجازی درانساج فشاری:	$0.6\ f'_{ci}$
حد اکثرتشنجات مجازی در انساج کششی :	$3\sqrt{f'_{ci}}$
حد اکثرتشنجات مجازی کششی درانجام بیم :	$6\sqrt{f'_{ci}}$
2- تشنجات تحت عمل سرویس لود (بعد ازمجازدادن تمام ضایعات پری سترس) نباید اضافه تر از حدود ذیل باشد:	
حد اکثرتشنجات مجازی در انساج فشاری :	$0.45\ f'_c$
حد اکثر تشنجات مجازی در انساج کششی:	$6\sqrt{f'_c}$

درجدول بالا f'_{ci} مقاومت کانکریت درزمان انتقال قوه های پری سترس و f'_c مقاومت 28 روزۀ کانکریت می باشد.

Design Aid 11.2.1 Table of concrete stresses, (psi)

f'_c	$0.45f'_c$	$0.6f'_c$	$\sqrt{f'_c}$	$2\sqrt{f'_c}$	$3.5\sqrt{f'_c}$	$4\sqrt{f'_c}$	$5\sqrt{f'_c}$	$6\sqrt{f'_c}$	$7.5\sqrt{f'_c}$	$12\sqrt{f'_c}$
2500	1125	1500	50	100	175	200	250	300	375	600
3000	1350	1800	55	110	192	219	274	329	411	657
3500	1575	2100	59	118	207	237	296	355	444	710
4000	1800	2400	63	126	221	253	316	379	474	759
5000	2250	3000	71	141	247	283	354	424	530	849
6000	2700	3600	77	155	271	310	387	465	581	930
7000	3150	4200	84	167	293	335	418	502	627	1004
8000	3600	4800	89	179	313	358	447	537	671	1073
9000	4050	5400	95	190	332	379	474	569	712	1138
10000	4500	6000	100	200	350	400	500	600	750	1200

جدول تشنجات مجاز کیبل های فلزی (فولادی) پری سترس مطابق کُدACI-318-77:

تشنج کششی (Tensile stress) درکیبل پری سترس نه باید بلندتراز حدود آتی باشد:
1- قوهٔ ماشین کشش کننده (Jacking force) $0.8f_{pu}$ یا $0.94f_{pu}$ هرکدام ازدو قمیت بالا کوچکترباشد اما نباید اضافه ترازقیمت اعظمی باشد که تولید کننده کیبل پری سترس آنرا توصیه می نماید.
2- کیبل متشنج شدهٔ قبلی (Pretensioning) فوراً بعدازانتقال قوه های پری سترس $0.70f_{pu}$
3- کیبل متشنج شدهٔ بعدی (Post-tensioning) فوراً بعدازانتقال قوه های پری سترس $0.70f_{pu}$

دراینجا $f_{pu} = f_s'$ مقاومت نهائی (Ultimate strength) کیبل می باشد.

معمولاً برای تنش دادن یا کش کردن یک کیبل پری سترس ضریب تقلیلی 0.75 استفاده می شود ، به عبارهٔ دیگریک کیبل پریسترس به اندازه 75% مقاومت نهائی آن تنش یا سترس داده می شود(در بالا به اساس کُد تعمیراتی ACI-318-77 حد مجاز 0.80 تا 0.90 داده شده) ولی ستندرد های تولید کننده گان پری سترس و PCI درایالات متحدهٔ امریکا، بخاطر تامین بیشتر فکتورامینی (Safety)، ضریب 0.75 را بکار می برند. بنابرآن قوه کش دادن یک کیبل پری سترس : Jacking stress = $0.75f_s'$ است.

کیبل های فولادی پری سترس :

کیبل های پری سترس به سایزهای ازقطر0.25 inch تا 0.6 inch ، با درجه یا grade 250 ksi و270 ksi میسر می باشند و درمارکیت جهانی زیرنام های تولیدی: کیبل های عادی فولادی: (black) finish ، epoxy coated ، stainless و یا Nickel plated عرضه می گردند. به صورت عموم درصنایع امروزی پری سترسد کانکریت کیبل های دارای خاصیت low relaxation (دارای آرامیده گی پائین) استفاده می شود. معمولی ترین کیبل برای پری سترسد کانکریت کیبل :

½ in ∅, Type 270 Ksi, low relaxation seven-wire strand

می باشد که مساحت خالص مقطع آن 0.153 in^2 ومقاومت نهائی یا (ultimate strength) آن 41.3 kips یا 270 ksi است.

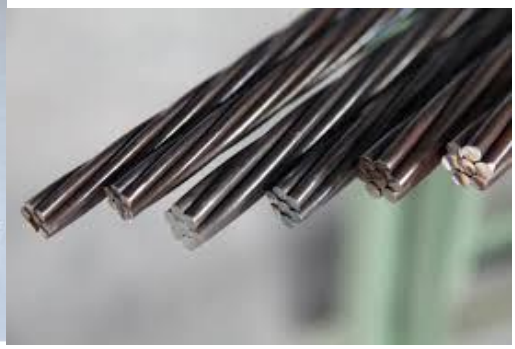
$f_s' = 270\ ksi$, a = 0.153 in^2 ksi = 1000 pound/inch²

$\therefore p_s = f_s'\ x$ a = 270 x 0.153 ≈ 41.30 kip 1 kip = 1000 pound

مقطع کیبل

Design Aid 11.2.3 Properties and design strengths of prestressing strand and wire

Seven-Wire Strand, f_{pu} = 270 ksi						
Nominal Diameter, in.	3/8	7/16	1/2	1/2 Special[a]	9/16	**0.600**
Area, sq. in.	0.085	0.115	0.153	0.167	0.192	0.217
Weight, plf	0.29	0.40	0.52	0.53	0.65	0.74
0.7 f_{pu} A_{ps}, kips	16.1	21.7	28.9	31.6	36.3	41.0
0.75 f_{pu} A_{ps}, kips	17.2	23.3	31.0	33.8	38.9	44.0
0.8 f_{pu} A_{ps}, kips	18.4	24.8	33.0	36.1	41.4	46.9
f_{pu} A_{ps}, kips	23.0	31.0	41.3	45.1	51.8	58.6



ضایعات پری سترس :

بصورت عموم ضایعات پری سترس 35 ksi تخمین زده می شود که این ضایعات در طول زمان به دلایل آتی به وقوع می پیوندند:

ES = elastic shortening of concrete (ارتجاعیت کوتاه شدن کانکریت)

CR = creep of concrete (خزیدن کانکریت)

SH = shrinkage of concrete (فشردگی یا انقباض کانکریت)

RE = relaxation of the steel strand (آرمیده گی کیبل فلزی)

$$\Delta fp = \Delta fpES + \Delta fpCR + \Delta fpSH + \Delta fpRE = 35\ ksi$$

مقدارضایعات 35 ksi بعد ازریسرچ ها ومحاسبات دقیق بصورت محتا طانه (conservative) مورد قبول همگانی جامعه انجنیری دیزاین عناصر پری سترس کانکریت قرار گرفته است، بنابرآن با درنظر داشت این ضایعات قیمت قوه نهائی پری سترسد برای یک کیبل با قطر 0.5 in چنین دریافت می شود:

1- قوه کشش کیبل: P_j = Jacking stress = $0.75f'_s = 0.75 \text{ x } 270 = 202.5$ ksi

$P_j = 202.5\ x\ 0.153 = \mathbf{31\ kips/strand}$

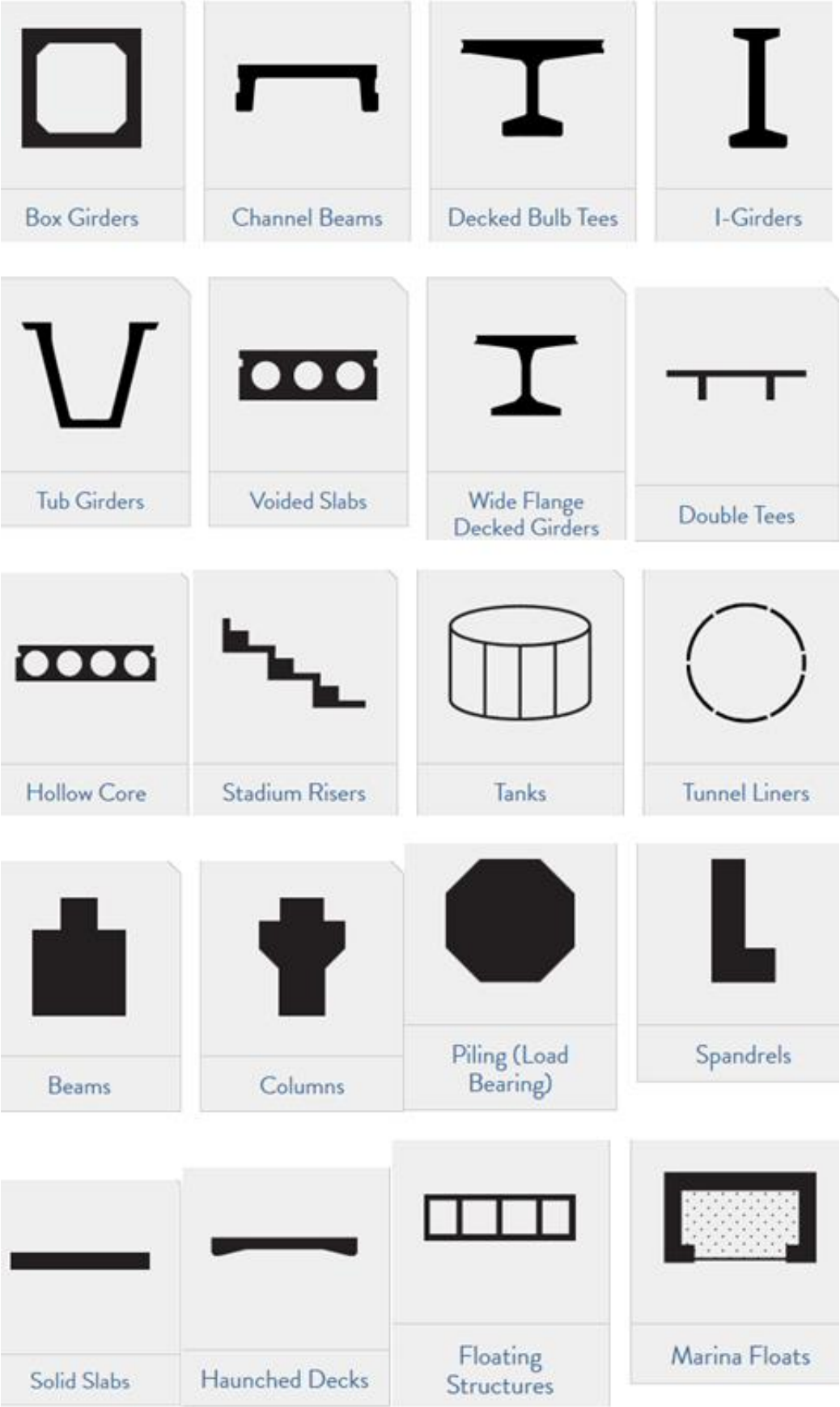
2 – قوه نهائي(final) پری سترس P_f بعد ازضایعات :

$$P_f = P_j - \Delta f_p = 202.5 - 35.0 = 167.5 \quad = 25.63\ kips/strand$$

قابل تذکراست که فوراً بعد از رهائی یا انتقال قوه های کششی در یک عنصرکانکریتی متشنج شدۀ قبلی یا پری سترسد (معمولاً کمتر از یک روزعمرکانکریت سخت شده) اولین ضایعاتی که صورت می گیرند عبارت اند: ازضایعات ازاثرارتجاعیت کوتاه شدن کانکریت (ES) ویک مقدار کوچک ضایعات ازاثر آرمیده گی کیبل (RE) می با شند. دراین وقت تشنجات وارده در کانکریت (Jacking stress) ازمقدار 202.5 ksi به 189 ksi تقلیل می یابد واین مقدارتقریباً 13% اضافه ترازقیمت تشنجات نهائی (P_f) بعداز ازدست دادن تمام ضایعات طویل الامدت می باشد.

نوت :انتخاب مقطع مختلط درحقیقت سایزبیم را تقلیل داده و توانائی عنصررا تزئید می بخشد، ومعمولاً برای بوجود آوردن یک مقطع مختلط از سلب یک ریخت یا عناصرپری کست استفاده میشود .

انتخاب عناصر پری کست – پری سترسد، امکان آنرا میسر می سازد که جهت پائین آوردن وزن خود عنصر، مقطع عنصررا عوض شکل سادۀ هندسی مستطیلی ازاشکال هندسی I وT مانند و ذوذنقه ای و مستطیل میان خالی استفاده نمود. این اشکال میتوانند دارای قیمت های بلند مومنت انرشیا و مودول مقطع باشند. بعضی مثال های ستندرد ها را درایالات متحدۀ امریکا در اشکال ذیل ملاحظه خواهید نمود.


Box Girders
Channel Beams
Decked Bulb Tees
I-Girders
Tub Girders
Voided Slabs
Wide Flange Decked Girders
Double Tees
Hollow Core
Stadium Risers
Tanks
Tunnel Liners
Beams
Columns
Piling (Load Bearing)
Spandrels
Solid Slabs
Haunched Decks
Floating Structures
Marina Floats

روش عمومی دیزاین عناصرانحنائی پری سترسد

منظور ازاین بخش ارائه قدم به قدم روش عموی است که برای دیزاین عناصر انحنائی پری سترسد به کار برده می شود و طوری ترتیب گردیده که دیزاین از مراحل اولی که وایه (ویا بعضاً مقطع) عنصر وبار ها معلوم است آغاز می گردد.

فکتور های معلوم:

1 – وایه (span) و (بعضاً مقطع - section)

2 – بارهای واردهٔ خوابیده یا دایمی (Dead load) وبارهای زنده یا مؤقتی (Live load) وترتیب اثر آنها.

3 – مقاومت کانکریت

4 – درجه یا Grade و کلاس کیبل پری سترس.

5 – تشنجات (مقاومت) مجازکانکریت ، وکیبل پری سترسد دروقت رهائی قوه های کششی وهم تحت عمل سرویس لود.

6 – تخمین از دست دادن مقدارقوه های پری سترس

7 – ضرورت انحنای مثبت (camber) و انحنای منفی یا خمیده گی (deflection).

فکتور های نامعلوم که باید دریافت شوند:

1 – سایز بیم اگر داده نشده باشد.

2 – تعداد کیبل های پری سترسد.

3 – سایز کیبل پری سترسد.

4 –موقعیت و ترتیب جا گذاری کیبل های پری سترس درعنصر پری سترسد.

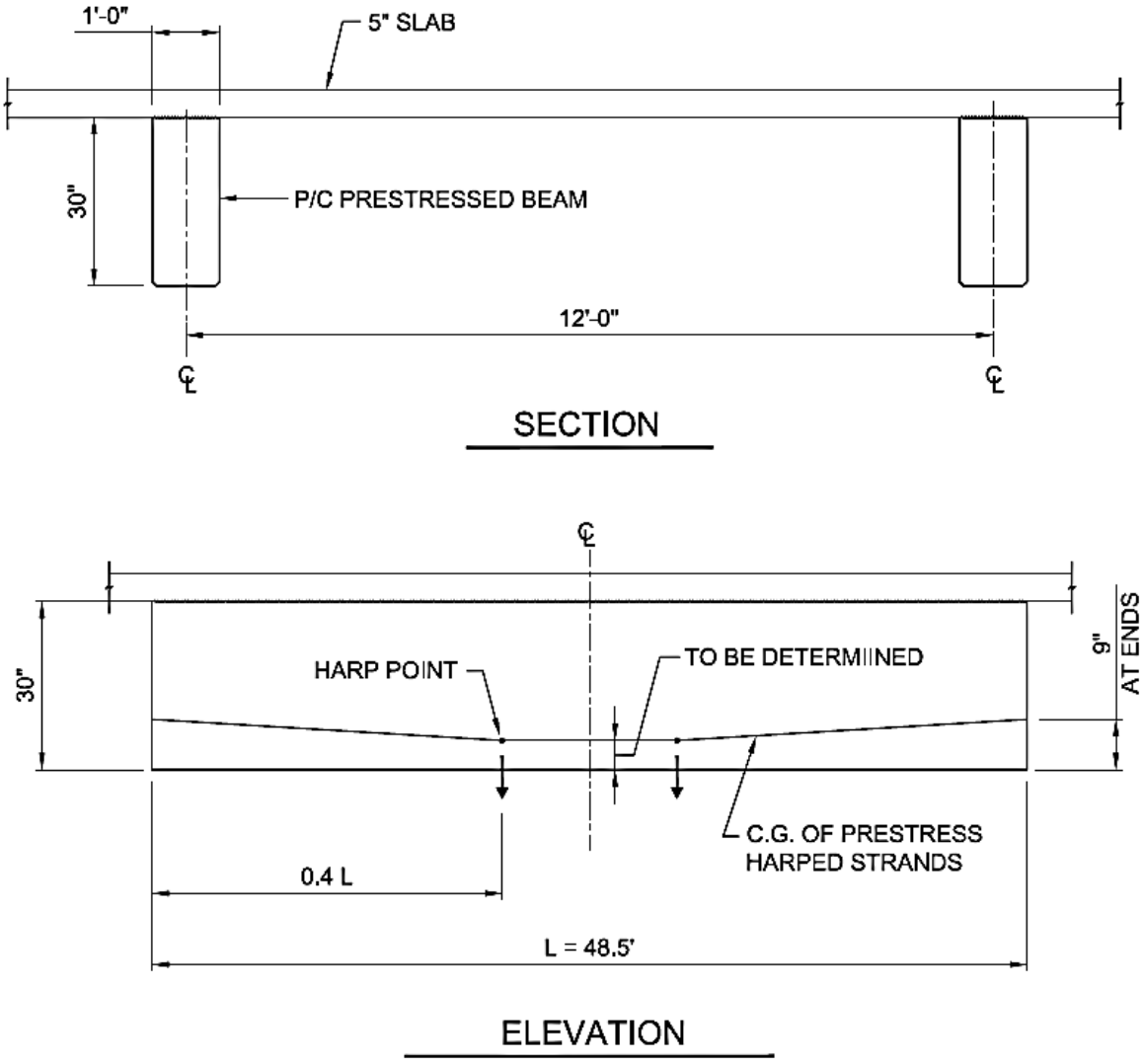
درمحاسبات یک عنصر پری سترسد، دریافت موقعیت نقاطی که برای برداشته شدن عنصر وهم موقعیت اتکای عنصربرای نگهداری وجریان ترانسپورتیشن لازمی می باشد ،بایست مشخص و محاسبه گردد ، زیرا چنین موقعیت ها میتواند تأثیرقابل ملاحظه در camber و Deflection عنصر داشته باشد. سعی می گردد تا این نقاط نزدیک به انجام های بیم باشد.

نوت: معمولاً تولید کننده گان عناصر پری سترسد سایزو مشخصات عناصررا بصورت کتلاک ها ارائه می نمایند. درصورت عدم موجودید چنین معلومات عمق بیم مورد نظرازطرف انجنیرانتخاب شده واسا س محاسبا ت قرار داده می شود؛ وبدین ترتیب دیزاین ادامه می یابد.

برای سهولت و ساده گی محاسبات ساده ترین مثال را مورد ارزیابی و تحلیل قرارمی دهیم:

مثال

مطلوب است: دیزاین یک بیم یک وایه ای ساده (simple span) پری سترسد با مقطع 12 in x 30 in که بالای آن سلب یک ریخت به ضخامت 5 in قرار داشته و فاصله بین بیم ها ازمرکزتا مرکز12 ft، وطول وایه ازاتکای ها به فاصله 48.5 ft باشد . درهنگام ریختن سلب بالائی، شمع کاری بیم ها صورت نگیرد.



شکل 11

همچنان داده های ذیل برای این مثال معلوم است:

1- کانکریت :

مقاومت کانکریت بیم دروقت انتقال قوه های پریسترس : $f'_{ci} = 4500$ psi

مقاومت 28 روزهٔ کانکریت بیم : $f'_c = 6000$ psi

مقاومت 28 روزهٔ کانکریت سلب : $f'_c = 3000$ psi

وزن حجمی کانکریت متراکم شدهٔ بیم پری سترسد : $\gamma_p = 160$ lb/ ft^3

وزن حجمی کانکریت متراکم شدهٔ سلب یک ریخت : $\gamma_s = 150$ lb/ ft^3

2- بارها :

بارمردهٔ بالای سلب یک ریخت 25 psf Superimposed dead loads

بارزنده 55.8 psf Live load

3- پری سترسنگ Prestressing :

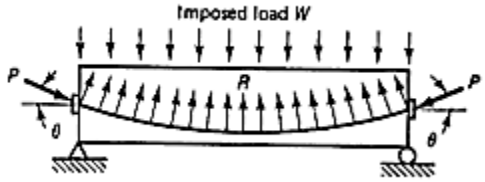
قوهٔ داده شده برای تنش دادن کیبل پری سترس Jacking force = 202.5 ksi = 31 kips

ضایعات طویل المدت پری سترس Long term losses = 35 ksi

فاصله هارپ کیبل های پری سترس Harp strands – harping point = 0.4 x span

مرکزثقل کیبل ها درانجام های بیم ازپائین 9 in C.G. of strands from bottom of beam at ends

HARP هارپ چه است؟ به شکل 11(Elevation) و شکل 9 دیاگرام (d) مراجعه نمائید. از آنجائیکه بوجود آوردن انحنای پارابولیک درکیبل های پری سترسد جهت ایجاد عکس العمل منظم منقسمه که سبب انحنای مثبت یا camber گردد ناممکن است، هارپ کردن بوسیله ایجادمیلان ثابت با عن المرکزیت متغییریا درتمام کیبل ها و یا در بخشی ازآنها صورت می گیرد که درنتیجه عکس العمل ایجاد شده مشابه به خط پارابولیک می باشد چنانچه درشکل ذیل نشان داده شده است. هارپ میتواند دریک نقطهٔ وسط وایه یا دونقطهٔ متناظر به مرکزوایه باشد.

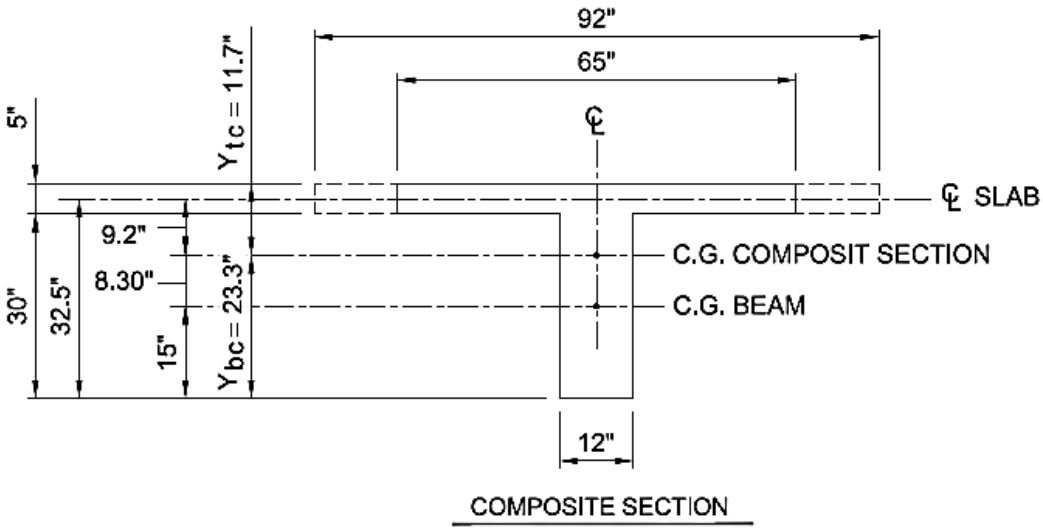


برای حل مثال بایست پروسه دریافت ها به ترتیب ذیل صورت گیرد.

- دارائی ها یا مشخصات مقطع کانکریت Section properties
- دارائی ها یا مشخصات مقطع مختلط کانکریت Composite section properties

- دریافت قوه ها ی پریسترس وعن المرکزیت ؛ حدود تشنجات بالائی در وسط وایه بعد از تمام ضایعات پریسترس در حد تقریبی صفر.
- ترتیب جدول انتقال قوه ها در harp point
- ترتیب جدول قوه های نهائی پریسترس در وسط وایه
- قوه های فکتور شده برش و مومنت ها
- مقاومت نهائی انحنائي(Ultimate flexural strength).
- ارزیابی قوهای برشی shear مطابق ACI 319 Commentary
- خمیده گی یا Deflections

دریافت دارائی های مقطع:



شکل 12

دارائی ها مقطع بیم بصورت مجرد بدون سلب بالائی:

$$A = bh = 12x30 = 360\ in^2$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{12x30^3}{12} = 27{,}000\ in^4$$

$$S_t = S_b = \frac{bh^2}{6} = \frac{12x30^2}{6} = 1{,}800\ in^3$$

دریافت جداگانهٔ مودول الستیک کانکریت (Modulus of elasticity) برای بیم پریکست وسلب بالائی بیم به اساس UBC :

$$E_c = 57{,}000\sqrt{f_c'}$$

برای بیم پریکست – پریسترسد:

$$E_{c,b} = 57,000\sqrt{6,000} = 4,415,201$$

برای سلب کانکریتی بالای بیم:

$$E_{c,s} = 57,000\sqrt{3,000} = 3,122,019$$

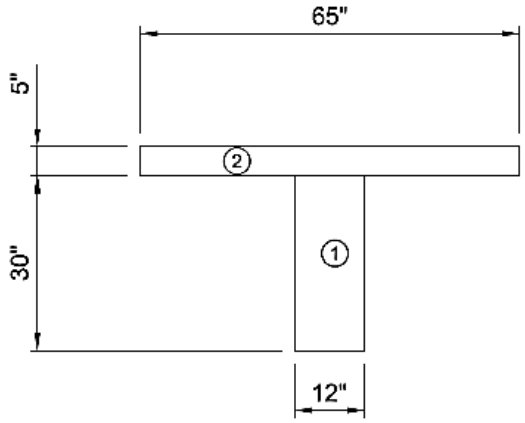
$$\frac{E_{c,s}}{E_{c,b}} = \frac{3,122,019}{4,415,201} = 0.7071$$

مطابق UBC عرض سلب برای مقطع مختلط جهت استفاده برای محاسبات انحنائی باید عرض بیم جمع هشت چند ضخامت سلب درهردوطرف محورعمودی بیم باشد:

2(b/2+ 8 t) = 2 (12/2 + 8 x 5) = 92 in.

بنا برآن عرض T- Section برای مقطع مختلط بیم پریکست وسلب یکریخت :

B = $\frac{E_{c,s}}{E_{c,b}}$ x 92 = 0.7071 x 92 = 65 in



از شکل بالا دارائی ها یا مشخصات مقطع مختلط رابه ترتیب ذیل دریافت نموده وجدول آنرا ترتیب می دهیم:

جدول مشخصات یا دارائی های مقطع مختلط

	A	Y_b	Ay_b	d	Ad^2	I_0	$I_0 + Ad^2$
Slab	325	32.5	10,562.50	9.2	27,508	677.08	28,185
Beam	360	15	5,400	8.30	24,800	27,000	51,800
Total(Σ)	685		15,962.5				79,985

$$A_c = 685\ in^2$$

$$Y_{bc} = \frac{\sum Ay_b}{\sum A} = \frac{15,962.5}{685} = 23.30 \ in$$

$$Y_{tc} = h_c - Y_{bc} = 35 - 23.30 = 11.70 \ in$$

به شکل 12مراجعه شود. بعد ازدریافت موقعیت مرکزثقل مقطع مختلط ، d یا فاصله های مراکز ثقل سلب و بیم را نظر به مرکز ثقل مقطع مختلط دریافت میکنیم:

$$d_s = Y_{sl} - Y_{bc} = 32.5 - 23.30 = 9.2$$

$$d_b = Y_{bc} - Y_b = 23.30 - 15 = 8.30$$

مومنت انرشیای بیم قبلاً دریافت شده ، مومنت انرشیای سلب:

$$I_0 = \frac{b\,h^3}{12} = \frac{65\ x\ 5^3}{12} = 677.08 \ in^4$$

مومنت انرشیای مقطع مختلط:

$$I_c = \sum (I_0 + Ad^2) = 79,985 \ in^4$$

(Section Modulus) مدول مقطع مختلط:

$$S_{tc} = \frac{I_c}{Y_{tc}} = \frac{79,985}{11.70} = 6,836 \ in^3$$

$$S_{tc} = 6,836 \ in^3 / 0.7071 = 9,668 \ in^3$$

$$S_{bc} = \frac{I_c}{Y_{bc}} = \frac{79,985}{23.3} = 3,433 \ in^3$$

همچنان دارائی های مقطع مختلط نظر به خط مشترک بین سلب و بیم:

$$Y_{ic} = 6.69 \ in$$

$$S_{ic} = 11,956 \ in^3$$

دریافت مومنت ها و تشنجات در انساج پائینی بیم:

وزن بیم در طول یک فت :

$$\omega_p = A\ x\ \gamma_p = \frac{360}{12x12}\ x\frac{160}{1000} = 0.400\ kip/ft$$

وزن سلب درطول یک فت با درنظرداشت فاصله بیم ها به اندازه 12 ft:

$$\omega_s = A\ x\ \gamma_s = 12\ x\ 5/12\ x\frac{150}{1000} = 0.750\ kip/ft$$

قبلاً بارهای مرده و زنده داده شده است : $D_l = 25$ psf و $L_l = 55.8$ psf

$$\omega_d = 25\ x\ 12\ x\frac{1}{1000} = 0.300\ kip/ft$$

$$\omega_l = 55.8\ x\ 12\ x\frac{1}{1000} = 0.670\ kip/ft$$

حالا مومنت ها را با در نظر داشت بارهای بالا از فورمول : $M = w\ l^2/8$

و سترس یا تشنج را از فورمول : $f = \frac{M\ x\ 1000}{S_{b\,(bc)}}$

دریافت می کنیم:

$$M_b = \frac{0.4\ x\ 48.5^2}{8}\ x12 = 1411\ \ kip - in$$

M_s = 2,646 kip-in,

M_{dl} = 1,059 kip-in

M_{ll} = 2,364 kip-in

قمیت های S_b و S_{bc} قبلاً دریافت شده، پس جدول مومنت ها و تشنجات را ازاثرسرویس لود ترتیب می دهیم (جدول1):

نوت : پیشنهاد می گردد تا ترتیب جدول های مشابه به جدول 1 درهمه مراحل و حالات محاسبات عناصر پری سترسد انجام داده شود تا بتواند ازیک طرف ازپراگندگی محاسبت جلوگیری کرد وازجانب دیگر محل مراجعهٔ سریع برای مشاهدهٔ نتایج آخری محاسبات تشنجات در تمام مراحل بار گذاری شده بتواند.

جدول 1

بارها	ω وزن یا بار (kip/ft)	Moment مومنت $(kip-in)$	S_b or S_{bc} (in^3) مدول پائینی مقطع	Bottom fiber Stress تشنجات انساج پائینی (psi)
Girder (160 lb/ft^3) بیم	0.400	1,411	1,800	784
Slab (150 lb/ft^3) سلب	0.750	2,646	1,800	1,470
Superimposed DL (25 psf) بارمردۀبالائی	0.300	1,059	3,433	308
Live Load (55.8 psf) بار زنده	0.670	2,364	3,433	689
		تشنجات مجموعی $\Sigma\,[\,{}^{M}/_{Sb(c)}] =$		3,251

دریافت تشنجات لازم یا ضروری:

قوه نهائی پری سترس P ازمعادله اساسی (1) دریافت می شود.

طوریکه دیده می شود تمام قمیت های معادله (1) به استثنای قمیت های P وعن المرکزیت e معلوم است. بنابرآن برای دریافت قیمت P باید یک قیمتی برای e داشته باشیم که این دردوحالت امکان پذیرمی باشد :اول : عن المرکزیت باید درحدود اندازه های فزیکی بیم باشد و دوم: درحد ازدیاد تشنجات کششی مجازانساج بالای بیم قرار داشته باشد.

<u>مورد اول-</u> عن المرکزیت درحدود اندازه های بیم (داده می شود) ؛ یعنی کیبل های پری سترس دربیم باید درموقعیتی با ضخامت کافی پوشش کانکریت قرارداده شود طوریکه قمیت اعظمی e مساوی به :

y_b - 3 in باشد. البته در بیم های بزرگ قیمت اعظمی e میتواند چندین انچ اما کمتراز قمیت y_h باشد.دراین مثال : $y_h = y_b = h/2 = 30/2 = 15$ in است.

<u>مورد دوم –</u> در این حالت حد مجازی کشش انساج بالائی (اگرباشد) انتخاب می گردد و بعد تشنجات ضروری فشاری انساج پائینی با در نظرداشت بار، معلوم و دریافت می گردد.

البته، بعد ازدانستن تشنجات کششی انساج بالائی وتشنجات فشاری انساج پائینی میتوان تشنجات را در مرکزثقل مقطع دریافت نمود :

$$f_{cg} = \frac{P}{A}$$

اگردرحل این مثال ، مورد اول فرض شود که محاسبات را کنترول نماید، پس بعد ازآن که قیمت های P و e دریافت شد ، تشناجات انساج بالائی هم باید چک یا محاسبه شود. اما اگرمورد دوم در محاسبات کنترول داشته باشد، اول باید قیمت ضروری و مناسب e را با قراردادن موقعیت منطقی مجموع کیبل های پری سترس در مقطع بیم دریافت کرد. لازم است تا هردو مورد بالا ارزیابی گردد.

مورد اول فرض کنیم که :

$$e = y_b - 3\ in. = 12\ in$$

است پس ازمعادله اساسی (1) قمیت P را به ترتیب ذیل دریافت می نمائیم:

$$P = \frac{\Sigma\left[{}^{M}/_{Sb(c)}\right] + f_{t\ \ allow}}{{}^{1}/_{A} + {}^{e}/_{S_b}} \qquad (2)$$

قیمت $\Sigma\left[{}^{M}/_{Sb(c)}\right]$ از جدول 1، عبارت از مجموع تشنجات انساج پائینی تحت عمل تمام بارهای وارده به شمول وزن خودعنصرمی باشد. طوریکه قبلاً تذکر داده شده ، برای تشنجات کششی علامه (-) بکاربرده می شود.

درمثال فوق حد اکثر تشنجات مجازی در انساج کششی مطابق ACI-318 جدول بالا:

$$\boldsymbol{f_{t\ allow} = 6\sqrt{f'_c} = 6\sqrt{6,000} = 465\ \text{psi}}$$

می باشد ، پس قیمت P را از معادله (2) دریافت می توان کرد :

$$P = \frac{3,251 - 465}{{}^{1}/_{360} + {}^{12}/_{1,800}}\left(\frac{1\ kip}{1,000\ lb}\right) = 295\ kips$$

حالا تشنجات بالائیی درسط وایه هم باید ارزیابی و چک شود . طوریکه قبلاً گفته شد که بصورت نورمال تشنجات تحت عمل وزن خودعنصر همزمان با تشنجات قوه های پری سترس صورت می گیرد بنابرآن باید تشنجات انساج بالائیی ازمحاسبه عمل مختلط قوه های پری سترس و وزن خود عنصر دریافت گردد، دراین صورت:

$$f_t = \frac{P}{A} - \frac{p\ e}{S_t} + \frac{M_g}{S_t} =$$

$$= \frac{295,000}{360} - \frac{295,000\ x\ 12}{1,800} + \frac{1411}{1,800}\ x\ 1,000 = -363\ (\ 363\ \ psi\ tension)$$

کد UBC بصورت شفاف حدی را برای تشنجات بالائیی کششی درصورتیکه به اندازه کافی مقدارسیخ تعبیه گردد تعیین نمی کند ولی درمورد این مثال تشنجات بالائیی دروسط وایه مطلوب وخواستنی ما نیست وقبلا تقریبا صفرقبول شده است ، فلهذا کیس 2 یا مورد دوم حل این مثال را کنترول می کند.

در صورت بکار بردن کیس 2 برای دریافت قیمت های P و e پیشنهاد می گردد تا تشنجات انساجی پائینی و بالائی از اثرقوه های پری سترس و وزن عنصر در وسط وایه دریافت گردد .و بعد، دریافت این دو قیمت را میتوان از عمل قوه پری سترس درمرکز ثقل دریافت نمود:

$$P = f_{cg}\,(A)$$

برای دریافت قیمت P فرض می کنیم که تشنجات انساج بالائی مسا وی به صفرباشد، به تبصره فوق مراجه شود یعنی:

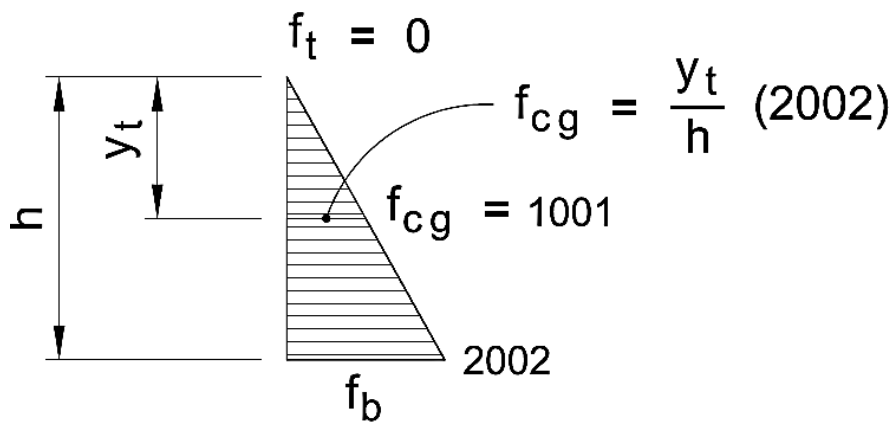
$$f_t = \frac{P}{A} - \frac{p\,e}{S_t} + \frac{M_g}{S_t} = 0$$

دراین صورت تشنجات لازمی انساج فشاری پائینی تحت عمل مختلط بارها قرار ذیل می باشد:

$$f_b = \frac{M_s}{S_b} + \frac{M_{dl}}{S_{bc}} + \frac{M_{ll}}{S_{bc}} - f_{t\,allow} =$$

$$= 1{,}470 + 308 + 689 - 465 = 2{,}002 \text{ psi}$$

در محاسبهٔ بالا، قیمت های تشنجات تحت عمل بار سلب ، بارمرده و بارزنده از جدول 1 گرفته شده، قیمت حد اکثر تشنجات مجازی کششی قبلاً (465) دریافت گردیده است و تشنجات انساج بالائی صفراست .پس با مراجعه به شکل (13) قیمت f_{cg} تشنجات را درمرکزمقطع میتوان چنین دریافت نمود.



REQUIRED STRESS AT MIDSPAN

شکل 13

از شکل بالا قیمت f_{cg} نصف تشنجات پائینی یا 1,001 psi = 1.001 kips/in^2 می باشد . باید توجه کرد که اگرمقطع عنصر پری سترس غیر متناظر باشد درآن صورت ($y_t \neq y_b$) می باشد. و باید قیمت f_{cg} مطابق به آن ها محاسبه گردد.

حالا قوۀ پری سترس را به ترتیب ذیل دریافت می کنیم :

$$P = f_{cg}\,(A) = 1.001\ x\ 360 = 360.4\ \ kips$$

قبلاً تحت عنوان ضایعات پری سترس قیمت قوۀ نهائی یک کیبل پری سترس،

$$P_f = 25.63\ kips/strand$$

دریافت شده بود، پس حالا میتوان تعداد کیبل های پری سترس را دریافت نمود :

$$N_{ps} = \frac{P}{P_f} = \frac{360.4}{25.63} = 14.06$$

تعداد 14 کیبل را با مجاز دادن یک مقدار بسیارکم تشنجات درانساج بالا ئی مورد استفاده قرارمی دهیم، پس در اینصورت قوۀ نهائیی پری سترس:

$$P = N_{ps} x\ P_f = 14\ x\ 25.63 = 358.82\ \ kips$$

وقیمت عن المرکزیت حقیقی:

$$e = \frac{S_b}{P}\left[\Sigma\left(\frac{M}{S_{bc}}\right) + f_{t\ allow} - \frac{P}{A}\right] =$$

$$= \frac{1{,}800}{358{,}820}\left(3{,}251 - 465 - \frac{358{,}820}{360}\right) = 8.98\ in$$

می باشد که آنرا e = 9.0 in قبول مینمایم.

محاسبۀ تشنجات دروقت انتقال قوه های پری سترس:

برای ارزیابی تشنجات در هنگام انتقال قوه های پری سترس در کانکریت فرض می شود که قوه اولی P_i به اندازه 13 درصد اضافه ترازقوه نهائی پری سترس باشد.

$$P_i = 1.13\ x\ P = 1.13\ x\ 358.82 = 405.5\ \ kips$$

تشنجات درنقطه هارپ Harp point درلحظۀ انتقال قوه های پری سترس درجدول (2) خلاصه شده است .

جدول (2)

	تشنجات عامل	Top انساج بالائی (psi)	Bottom انساج پائینی (psi)
1	تشنج ازاثرقوهٔ اولی مرکزی پری سترس $P_i/A = 405{,}500/360$	1,126	1,126
2	تشنج ازاثرعن المرکزیت قوهٔ اولی پری سترس $P_i\, e/S = 405{,}500\ (9.00)/1{,}800$	-2,027	2,207
3	تشنج ازاثروزن خود عنصر * $M_g/S = (1{,}411{,}000/1800)\ (0.96)$	753	-753
4	تشنج در وقت رهائی یا انتقال قوه ها Stress at release حاصل جمع الجبری سطر 1,2,3 .	-148	2,580
2	تشنجات مجاز ($3\sqrt{f'_{ci}}$, $0.6f'_{ci}$) Allowable stress	-201	2,700
	UBC 1918.4.1	OK	OK
* Assumes harping at 0.4 L موقعیت انتخاب شدهٔ نقطه هارپ			

تبصره درمورد جدول بالا:

1- در سطر 1 و2 ، $S_t = S_b$ به S نشان داده شده است ، به استثنای علامه ها تشنجات انساج بالائی و پائینی دارای عین قمیت اند.
2- درسطر3 ، ضریب 0.96 برای تقلیل مومنت اعظمی از وسط به فاصله 0.4L یا نقطهٔ هارپ بیم بکار رفته که در حقیقت 4٪ ، خیلی محافظه کارانه است.
3- f'_{ci} عبارت از مقاومت کانکریت (4,500 psi) در موقع Release یا انتقال قوه های پری سترس در کانکریت می باشد.

طوریکه دیده می شود تشنجات انساج بالایی (148 –) کمترازتشنجات مجاز $f_{t\ allow}$ = **465 psi**

مطابق کد می باشد فلهذا می شود که با آنهم بصورت اصغری 2 سیخ #4 را دربالای بیم استفاده نمائیم .

تشنجات تحت عمل سرویس لود در جدول (3) خلاصه شده:

جدول (3) – تشنجات آخری وسط وایه به پوند برانچ مربع (psi) است.

	تشنجات عامل	Top of Slab انساج بالائی سلب (psi)	Top of Beam انساج بالائی بیم (psi)	Bottom of Beam انساج پائینی بیم (psi)
1	$\frac{P}{A} = \frac{358,820}{360}$ تشنج ازاثر قوۀ مرکزی پری سترس		997	997
2	$\frac{P\,e}{S} = \frac{358,820\ (9.00)}{1,800}$ تشنج ازاثرعن المرکزیت قوه		-1,794	1,794
3	$\frac{M_g}{S} = \frac{1,411,000}{1,800}$ تشنج ازاثروزن خود عنصر		**784**	**-784**
4	Stress at Erection تشنج درموقع منتاژیا نصب عنصر حاصل جمع الجبری سطر 1،2،3.		-13	2,007
5	$\frac{M_{ds}}{S} = \frac{2,646,000}{1,800}$ تشنج ازاثر وزن سلب		1470	-1470
6	$\frac{M_{dc}}{S_c} = \frac{1,059,000}{9,676}$;/11,956 * ; /3,433 * تشنج ازاثربارمردۀ بالائی (Superimposed dead load) $* S_{ic} = 11,956\ in^3$ $* S_{bc} = 3,433\ in^3$	**109**	**89**	**-308**
7	Dead Load Stress تشنجات بارهای مرده حاصل جمع الجبری سطر 4,5,6 . نوت: حد مجاز تشنجات بار مرده (allowable $0.45f_c'$)	109	1,546	229
8	برای بیم0.45(6,000) ,برای سلب 0.45(3,000)	1350	2700	2700
9	$\frac{M_l}{S_c} = \frac{2,364,000}{9,676}$;/11,956;/3,433 * تشنج از اثر باز زنده	**244**	**198**	**-689**
10	Stress at Service Load تشنجات تحت عمل سرویس لود حاصل جمع الجبری سطر 7,9.	353	1,744	-460
11	**Allowable Stress ($0.60f_c'$; $6\sqrt{f_c'}$)** **تشنجات مجاز** **0.6(3,000), 0.6(6,000), $6\sqrt{6,000}$**	1,800	3,600	-465
12	UBC 1918.4.2 مقایسه سطر 9 و 10.	OK	OK	OK

درجدول بالا دیده می شود که تمام تشنجات درحدود مجازآنها مطابق کود UBC و ACI می باشد. همچنان تشنجات دریافت شده درزمان نصب یا منتاژعنصردرموقعیت ساختمانی آن (سطر 4) به اساس فرضیۀ محاسبه شده که تا آن زمان تمام ضایعات پری سترس صورت گرفته و ضایعات بیشتری وجود نخواهد داشت واین یک فرضۀ بسیار ساده و کافی برای تمام کاربرد ها بوده میتواند.

ارزیابی بیم پری سترس تحت عمل بارهای فکتورشده (Ultimate) :

جدول (4)

	w- بار (kip/ft)	فکتورLF		w_u - بار (kip/ft)	V_u - شیر (kip)	M_u -مومنت (kip-in)
Beam بیم یا گادر	0.400	1.4	}	2.030	49.2	7,163
Slab سلب	0.750	1.4				
Superimposed Dead Load بارهای دیگر مرده	0.300	1.4				
Live Load بارزنده	0.670	1.7		1.139	27.62	4,019
Sum مجموع	2.120			3.169	76.8	11,191

محاسبات (Ultimate strength) یا مقاومت نهائی یک عنصرپری سترسد خیلی مشابه به محاسبات بیم معمولی آهن کانکریتی می باشد با تفاوت اینکه ؛ دریافت تشنجات سیخ (درین جا کیبل پری سترسد) برای (Nominal strength) یا مقاومت نامینال (f_{ps}) یک اندازه مغلق تراست و بدین منظور باید معادلهٔ طرح شده ACI و UBC مورد استفاده قرار گیرد:

$$f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]\right\}$$

ازآنجائیکه تنها سیخ ها درامتداد طول عنصرمطرح می باشد ، لهذا ω' و ω مساوی به صفر گرفته می شود، که با وضع کردن این قیمت ها معادلهٔ فوق بشکل ذیل اختصار می یابد.

$$f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'}\right]\right\}$$

درمعادله بالا :

f_{ps} مقاومت یا تشنجات نامینال سیخ (کیبل پری سترس).

f_{pu} مقاومت یا تشنجات نهائی سیخ (کیبل پری سترس).

γ_p ضریب یا فکتور برای کیبل پری سترس دارای ریلکسیشن پائین (کیبل مورد بحث این مثال) که 0.28 می باشد.

β_1 ضریب داده شده در UBC: که برای کانکریت دارای مقاومت 3000 psi ، 0.85 می باشد.

f_c' قبلاً تعریف گردیده است (مقاومت 28 روزه کانکریت).

ρ_p فیصدی مقدار پری سترس که تو سط معادله ذیل دریافت می گردد.

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{bd}$$

چون تشنجات فشاری مقاومت نامینال درحد سلب مقطع مختلط می باشد، لهذا قیمت $b = 92$ in ،

و d = 35 - 6 = 29 in است (به شکل 12و16) مراجعه شود،همچنان مقاومت کانکریت برای سلب 3000 psi است، پس:

$$\therefore \quad \rho_p = \frac{A_{ps}}{bd} = \frac{14x\ 0.153}{92\ x\ 29} = 0.000803$$

$$f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left[\rho_p\ \frac{f_{pu}}{f_c'}\right]\right\}$$

$$f_{ps} = 270{,}000\ \left[1 - \frac{0.28}{0.85}\left(0.000803\ \frac{270{,}000}{3{,}000}\right)\right] = 263{,}570\ psi$$

با در نظر داشت تشنج فوق قوه کششی سیخ(کیبل) برای مقاومت نامینال :

$$T_n = A_{ps}\ x\ f_{ps} = (\ 14x\ 0.153)(263.570) = 565\ kips$$

چون $T_n = C_n$ است فلهذا عمق یا ارتفاع قوه فشاری (بازوی قوه) را در مقطع با استفاده از فورمول ذیل دریافت می کنیم:

$$a = \frac{C_n}{b(\ 0.85\ f_c')} = \frac{598}{92\ (0.85x\ \frac{3{,}000}{1{,}000})} = 2.41\ in$$

مومنت نامینل:

$$\emptyset\ M_n = \emptyset\ T_n\ \left(d - \frac{a}{2}\right) = 0.9\ (565)\ (29.0 - 1.20) = 14{,}135\ kip - in$$

مومنت دریافت شدۀ بالا بنام مومنت تامین شده یا (provided moment) یادمی شود. با مقایسه این قیمت($\emptyset\ M_n$) و قیمت دریافت شدۀ (ultimate moment) M_u که درجدول 4 دریافت گردیده و بنام مومنت ضروری (required moment) یاد می شود، می یابیم که:

$$M_{u\ provided} = \emptyset M_n = 14{,}135\ kip - in > M_{u\ required} = 11{,}191\ kip - in. OK$$

پس دیده می شود که قیمت $M_{u\,provided}$ به اندازهٔ کافی بزرگتر از $M_{u\ required}$ می باشد بنابرآن مقدار اضافی سیخ طولانی ضروری نمی باشد.

محاسبهٔ برش Shear :

محاسبهٔ مقاومت برشی(Shear) توسط معادله 11-9 کُد UBC 1911.4.1 و ACI Code Commentary انجام می یابد:

$$V_c = \left(0.6\sqrt{f_c'} + 700\,\frac{V_u\ d_{actual}}{M_u}\right) b_w\ d_{actual} \qquad Equation\ 11-9$$

درعناصرعادی آهن کانکریتی تشنجات بحرانی برشی درنزدیک اتکای یک بیم قرارمی داشته باشند که باید محاسبه شوند ، اما برای عناصر پری سترستد کانکریت مقاومت برشی یا shear کافی نیست که تنها در نزدیک اتکا ها چک و محاسبه شوند بلکه این محاسبات بایست با استفاده از معادله 11-9 کُد UBC در امتداد تمام طول عنصر انجام داده شوند.

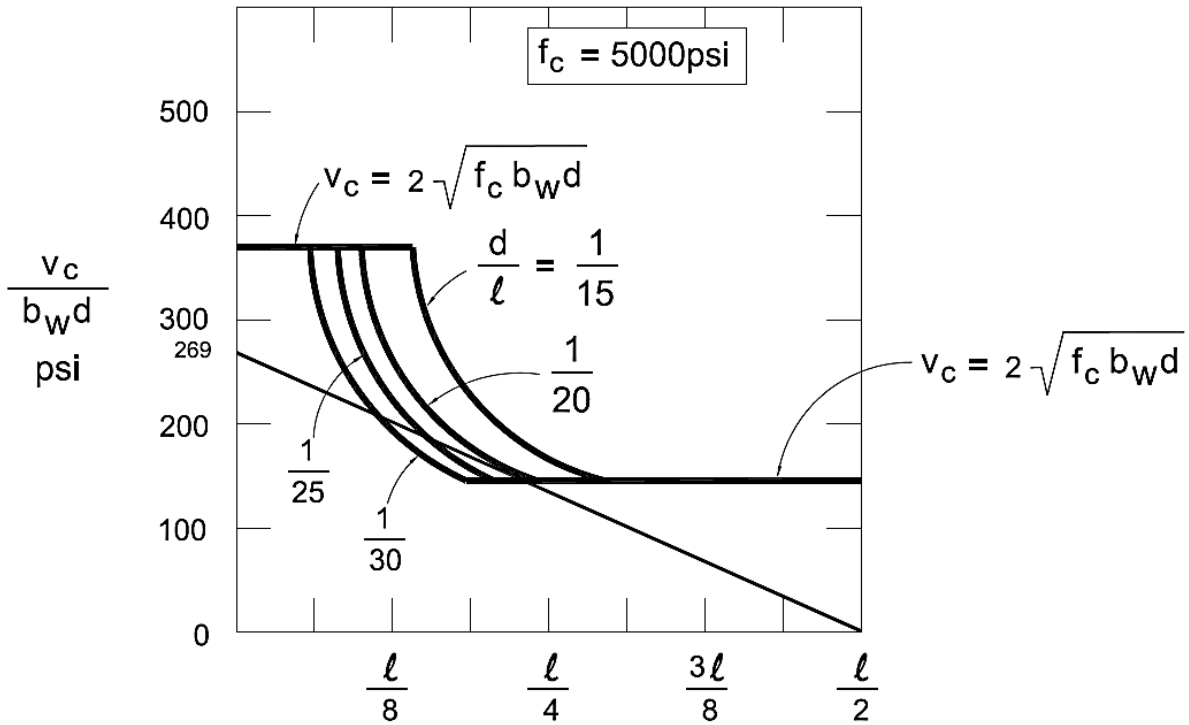
شکل R11.3.3.1 کُد ACI که درصفحه بعدی نشان داده شده، کاربرد معادله $11-9$ کُد UBC را برای بارها ی مساوی یا متحدالشکل درعناصرپری سترسد نشان می دهد.این کاربرد ACI برای کانکریت مقاومت $f_c' = 5{,}000\ psi$ ترتیب داده شده است ، اما میتوان آنرا با اطمینان محافظه کارانه برای کانکریت مقاومت $f_c' = 6{,}000\ psi$ و بالاترازآن نیزاستفاده نمود. دراین گراف خط عمودی (Y) مقدارتشنجات برشی و خط افقی (X)فا صله را ازیک اتکا تا مرکز وایه نشان می دهد. توابع نسبت های $\frac{d}{l}$ برای قیمت های مختلف (چهارقمیت: $d/l = 1/15$ ، $d/l = 1/20$ ، $d/l = 1/25$ ، $d/l = 1/30$) به خطوط منحنی در فاصله بین دو خط موازی که برای قیمت های حد اکثر و حد اقل V_c نشان داده شده است جا داده شده است.

MATERIAL PROPERTIES
REINFORCING BARS

Design Aid 11.2.7 Reinforcing bar data

ASTM STANDARD REINFORCING BARS							
BAR SIZE[a] DESIGNATION		NOMINAL DIMENSIONS					
		DIAMETER		AREA		WEIGHT OR MASS	
U.S. CUSTOMARY	SI	in.	mm	in²	mm²	lb/ft	kg/m
#3	#10	0.375	9.5	0.11	71	0.376	0.560
#4	#13	0.500	12.7	0.20	129	0.668	0.994
#5	#16	0.625	15.9	0.31	199	1.043	1.552
#6	#19	0.750	19.1	0.44	284	1.502	2.235
#7	#22	0.875	22.2	0.60	387	2.044	3.042
#8	#25	1.000	25.4	0.79	510	2.570	3.973
#9	#29	1.128	28.7	1.00	645	3.400	5.060
#10	#32	1.270	32.3	1.27	819	4.303	6.404
#11	#36	1.410	35.8	1.56	1006	5.313	7.907
#14	#43	1.693	43.0	2.25	1452	7.650	11.380
#18	#57	2.257	57.3	4.00	2581	13.600	20.240

a. Many mills will mark and supply bars only with metric (SI) designation, which is a soft conversion. Soft conversion means that the metric (SI) bars have exactly the same dimensions and properties as the equivalent U.S. customary designation.



DUSTANCE FROM SIMPLE SUPPORT, X
FIGURE 11.3.31 APPLICATION OF EQ (11-9) TO UNIFORMLY LOADED PRESTRESSED MEMBERS
ACI CODE COMMENTARY

رسم یا گراف ACI

شکل 14

به اساس کُد UBC عمق بیم یا اندازه d_{actual} برای محا سبات قوه برشی یک بیم پری سترس نباید کمتر از 0.8h باشد بنا برآن در مثال مورد بحث d_{actual} = 0.8(35) = 28 in است ، و نسبت

$$\frac{d}{L} = \frac{28}{48.5\ x\ 12} = \frac{1}{20.7}$$

می باشد، پس در گراف بالا قیمت تقاطع منحنی برای نسبت $\frac{1}{20}$ را با خط افقی V_c دریافت نموده وفاصله مورداستفاده سیخ بندی عرضانی برای برش را دریافت می کنیم.

همچنان درگراف بالا تشنج یا مقاومت نامینال برش دراتکا ها $V_n = \frac{V_c}{b_w\ x\ d}$ مشخص شده است، واز جدول 4 میدانیم که قمیت فکتور شده یا التیمت قوه برشی دراتکا ها V_u = 76.8 kips است.

پس برش نامینال(nominal shear):

$$V_n = \frac{\frac{V_u}{\emptyset}}{b_w d} = \frac{\frac{76.8}{0.85}}{12\ x\ 28} = 0.269\ ksi = 269\ psi$$

است . از گراف شکل 14 تقاطع خط منحنی $\frac{1}{20.7}$ و خط V_C تقریباً به طول $\frac{l}{4}$ وایه اصابت می کند. بنابرآن مقدارحد اقل سیخ عرضانی در این فاصله مورد نیاز می باشد.

UBC 1911.5.5 برای محاسبات مقدارحداقل سیخ های عرضانی درعناصر پری سترسد دو معادله ذیل را توصیه می نماید:

$$A_v = 50 \frac{b_w s}{f_y} \qquad (11.13)$$

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{ps}}{f_y} \frac{s}{d} \sqrt{d/b_w} \qquad (11.14)$$

در معادلات با لا A_v مساحت سیخ عرضانی، s فاصله بین سیخ های عرضانی و f_y عبارت از مقاومت نهائی قبل ازتخریب(مقاومت تسلیمی) (Yield strength) سیخ درکشش می باشد.

یکی ازاین دومعادله باید برای دریافت مقدارحداقل سیخ عرضانی استفاده شود.

معادله 11.14 معمولاً کمترین مقدار سیخ را بدست می دهد . اما UBC 1917.6.1 لازم می داند که برای مقطع های مختلط ، معادله 11.13 جهت دریافت مقدارسیخ عرضانی بکار برده شود مخصوصاً زمانیکه تایزها (ties) یا سیخ بندی عرضانی ازبالای بیم به داخل سلب امتداد داده می شود تا مقاومت عرضانی را در خط تقاطع عنصر پری کست و کانکریت یک ریخت سلب بالائی تا مین نماید.

در مثال حاضربرای دریاف مقدار سیخ های عرضانی از معادله 11.13 استفاده می نمائیم:

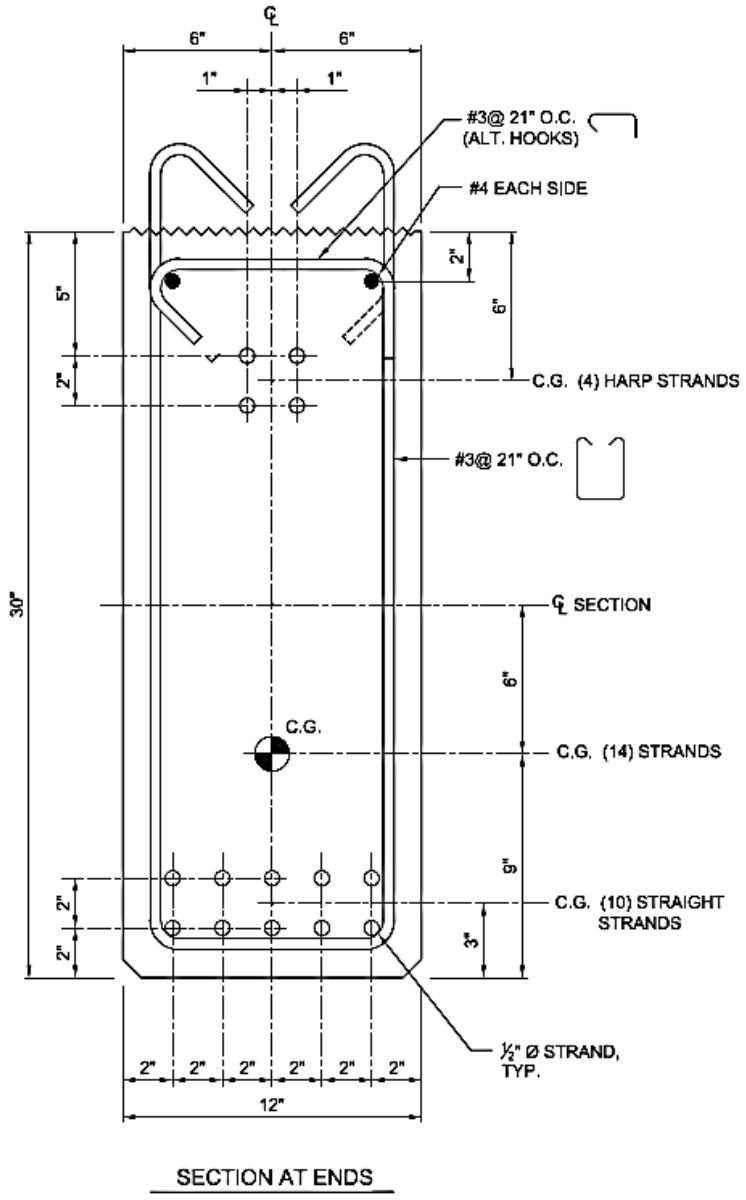
$$A_v = 50 \frac{12 \; x \; 12 \; {}^{in}/_{ft}}{60{,}000} = 0.12 \; {}^{in^2}/_{ft}$$

به اساس (UBC 1911.5.4.1) فاصله اعظمی سیخ های عرضانی نباید اضافه تر از 3/4h یا 24 in باشد . دراین مثال سیخ نمبر3 (#3) را با فاصله های 21 in (#3 stirrups at 21 in) انتخاب می کنیم. پس مساحت سیخ تهیه شده :

$$A_v = 2\,(0.11\; in^2) \left(\frac{12 \;\; {}^{in}/_{ft}}{21 \;\; in} \right) = 0.126 \; {}^{in^2}/_{ft} \;\; > \;\; 0.12 \; {}^{in^2}/_{ft} \quad OK$$

حالا که تمام یافته ها رابه شمول: تعداد کیبل های پری سترس، موقعیت مرکزثقل (center of gravity) قوه های پری سترس درانجام و وسط وایه ، ومقدار سیخ های ضروری طولانی وهمچنان عرضانی را

دریافت نموده ایم، پس میتوان موقعیت (14) کیبل پری سترس ودیگر سیخ های ضروری را در مقطع بیم مشخص ساخت.



شکل 15

دررسم فوق تقسیمات و قرار دادن کیبل های پرسترسد درانجام بیم نشان داده شده است.

از آنجائیکه به اساس محاسبات مقاومت نهائی (ultimate strength) درانساج پائینی علاوه ازکیبل پری سترس مقداراضافی سیخ طولانی ضرورت نیست(که اکثراً این مورد درهمه حالات صدق می کند) بنابرآن تعداد (14) کیبل را به دو گروپ ؛ کیبل های مستقیم وکیبل های هارپ تقسیم می نمائیم.

تناسب کیبل های مستقیم وهارپ مربوط مهارت انجنیردرکنترول تشنجات انساج بالائی و پائینی می باشد ولی میتوان آنرا ازفرضیه ایکه تعداد کیبل های هارپ میتواند تقریباً 1/3 تعداد مجموع کیبل ها باشد آغاز نمود.

دراین مثال تعداد کیبل های مستقیم (10) و تعداد کیبل های هارپ (4) انتخاب گردیده است، و این ها را در مقطع بیم باید طوری قرار داد که بصورت دقیق مطابقت به موقعیت مرکزثقل قوه های پری سترس درانجام و وسط وایه بیم داشته باشند.

دراین مثال موقعیت مرکز ثقل قوه پری سترس در انجام بیم 9 in داده شده بود.

پس عن المرکزیت (14) کیبل درانجام بیم:

$$e_{14\ str} = h/2 - e = 15 - 9 = 6\ in$$

است . با قرار دادن گروپ 10 کیبل مستقیم در پائین مقطع با موقعیت مرکز ثقل 3in ازانساج پائینی ، گروپ 4 کیبل هارپ را دربالا قرارمیدهم که مرکزثقل این گروپ نظر به انساج پائینی بایست دریافت گردد، لهذا

$$(9)\ (14) = (10)3 + (4)\ (y)$$

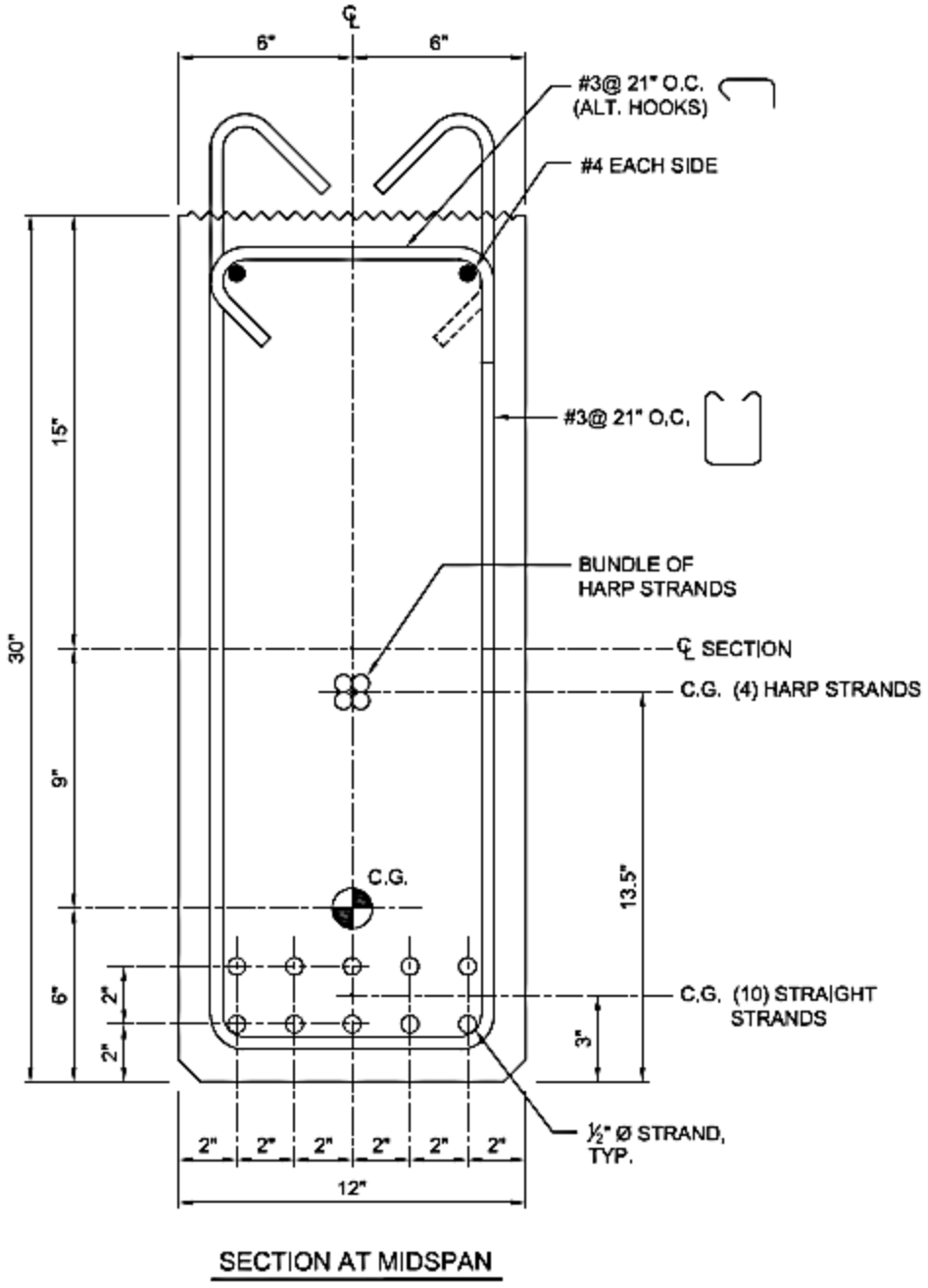
$$y = \frac{126 - 30}{4} = 24\ in$$

ازمحاسبات قبلی عن المرکزیت قوه های پری سترس در وسط وایه e = 9.0 in دریافت شده بود، پس مرکز ثقل تمام کیبل ها از پائینی مقطع 6 in = (9 – 15) است ، همچنان میدانیم که مرکز ثقل گروپ 10 کیبل مستقیم درموقعیت 3in از پائین مقطع قرار دارد. پس میتوان فاصله مرکزثقل گروپ 4 کیبل هارپ را دروسط وایه ازانساج پائینی به ترتیب ذیل دریافت کنیم:

$$(6)\ (14) = (10)3 + (4)\ (y_{harp})$$

$$y_{harp} = \frac{84 - 30}{4} = 13.5\ in$$

قابل تذکر است که ترجیح داده شود تا انجام سیخ های عرضانی عوض زانوخم 90 درجه با زانو خم 135 درجه که بنام (Seismic bend) یاد می شود قات گردند. بعظاً جهت سهولت و قابلیت ساخت قفسهٔ سیخ بندی اجازه داده می شود تا یک انجام 90 درجه و انجام دیگر 135 درجه قات شده و قرار دادن شان یک درمیان با خم 90 و 135 درجه باشند.

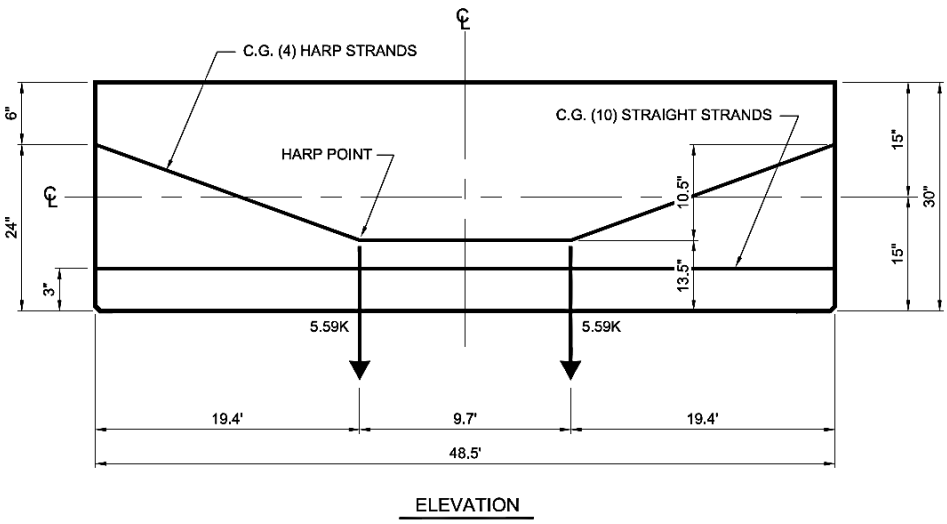


شکل 16

به شکل بالا برای موقعیت کیبل های هارپ در وسط وایه مراجعه کنید. این موقعیت در فاصله بین نقاط هارپ به فاصله 0.4L از انجام بیم وجود دارد و بایست قوه های هارپ نیز برای این نقاط دریافت گردد. به شکل 17 صفحه بعد جهت دریافت قوه های هارپ مراجعه شود :

$$arc\ tang = \frac{1}{12}\left(\frac{24-13.5}{19.4}\right) = 2.58°$$

$$F_{harp} = \sin 2.58° \ (4x31) = 5.58\ kips$$



شکل 17

محاسبه خمیده گی (انحنا) یا (Deflections) :

محاسبات خمیده گی یا Deflections درعناصر پری سترسد یک هنراست. دیفلکشن نهائی عبارت از تفاوت انحنای مثبت ایجاد شده درعنصرتوسط قوه های پری سترس وانحنای منفی که تحت عمل قوه های جاذبه وعمل بارها عامل صورت می گیرد می باشد. حاصل این دومیتواند خیلی حساس دربرابرتغییر بسیارکوچکی که درانتخاب فرضیهٔ اجزا و مؤلفه های دیفلکشن صورت می گیرد باشد. بدین اساس درمحاسبات دیفلکشن یک عنصرانحنائی پری سترسد باید شش فکتوراتی مدنظر گرفته شود:

1- تسلسل بارگذاری بالای بیم

2- استفادهٔ درست قوه پری سترس برای محا سبه دیفلکشن

3- استفادهٔ درست مدول الستیکیت (modulus of elasticity)

4- استفادهٔ ضریب برای creep (خزیدن) طویل المدت

5- مومنت انرشیا

6- انتخاب ضریب دیفلکشن

تسلسل بارگذاری درسه ستیج یا مرحله عمده صورت می گیرد:

1- عمل قوه پری سترس(مشتنج قبلی) همزمان با وزن خود عنصرکه بصورت عموم بعد از یک روز(درلحظهٔ انتقال قوه های پری سترس درکانکریت) اتفاق می افتد.
2- بارمرده یا بارهای دایمی سلب وغیره که بصورت دایم بعد ازچند هفته یا ماه عمل می کند.

3- بارزنده که بصورت متناوب درزمان های آینده عمل می کند.

برای محاسبه دیفلکشن ، استفاده قوه پری سترس 13 فیصد بالاترازقوه نهائی پری استرس توصیه شده و ضروری پنداشته می شود.

مدول الاستکیت که برای محاسبه دیفلکشن استفاده می گردد ازمقاومت کانکریت دروقت تاثیر بارها بدست می اید.

درمثال مورد بحث :

1- قوه پری سترس وباروزن خودعنصروقتی عمل می کند که مقاومت کانکریت $f'_{ci} = 4{,}500$ psi

ومدول الستکیت $E_{ci} = 57{,}000\sqrt{f'_{ci}} \cong 3{,}824{,}000\ psi \cong 3{,}824\ kip/in^2$ باشد.

2- و بعد وزن سلب وبارهای مرده و زنده وقتی عمل می کند که مقاومت کانکریت $f'_c = 6{,}000$ psi
و مدول الستکیت $E_c \cong 57{,}000\sqrt{f'_c} \cong 4{,}415{,}000\ psi = 4{,}415\ kip/in^2$ باشد.
3- درنظر گرفتن مقاومت کانکریت بعد از 28 روزکدام رولی را ایفا نمی کند.

باید گفت که : بایست مومنت انرشیای بیم عریان برای محاسبات دیفلکشن تحت اثرقوه های پری سترس و وزن خود بیم ، و بار سلب بالائی استفاده گردد. اما برای محاسبات دیفلکشن تحت عمل بارهای مختلط مرده (دایمی) و بارهای زنده باید استفادهٔ مومنت انرشیای مقطع مختلط مورد استفاده قرارگیرد.

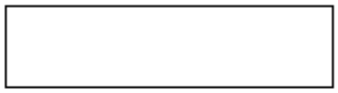
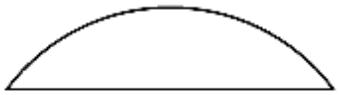
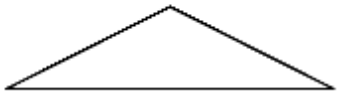
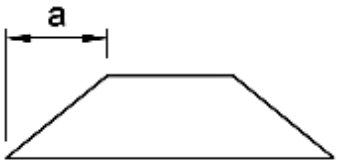
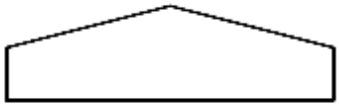
محاسبه دیفلکشن میتواند با استفاده از کویفشنت دیفلکشن (deflection coefficient) C_Δ ساده ترشود، وبنا برآن معادله ذیل به کار برده می شود:

$$\Delta = C_\Delta \frac{M\,L^2}{EI} \qquad (3)$$

دراینجا M مومنت وسط وایه است . به جدول 4 برای قیمت های مومنت بارهای مختلف مراجعه نمائید.

کویفشنت یا ضریب C_Δ مربوط شیپ دیاگرام مومنت می باشد، و در ذیل اشکال مختلف شیپ دایاگرام مومنت ها نشان داده شده است.

$$\Delta = c_{\Delta}\frac{M_{msp}L^2}{EI}$$

	SHAPE OF MOMENT DIAGRAM		c_{Δ}
1	UNIFORM		$\frac{1}{8}$
2	PARABOLIC		$\frac{5}{48}$ $(\cong \frac{1}{10})$
3	TRIANGULAR		$\frac{1}{12}$
4	TRAPEZOIDAL		$\frac{1}{8} - \frac{(a/L)^2}{6}$
5	CONTINUOUS		0.07 APPROXIMATLY
6	COMBINATION		USE C_{Δ} ABOVE FOR EACH PART

MOMENT DIAGRAM FOR DEFLECTION CALCULATIONS

جدول دایاگرام ها برای محاسبه دیفلکشن .

طوریکه در جدول فوق دیده می شود تمام ضریب های C_Δ برای دایاگرام مومنت ها ی بیم های وایهٔ ساده (simple span) متفاوت از 1/8 تا 1/12 می باشد. این ضریب ها برای شیپ های دیگرهم میتواند با دقت لازم تخمین گردند. همچنان این ضریب ها برای بیم های شکل چندین وایه ای بصورت تقریبی تخمین شده میتواند که البته قمیت حقیقی آن ها مربوط به نسبت مومنت وسط وایه ومومنت انجام عنصرمی باشد.

انتخاب دقیق ودرست ضریب برای خزیدن طویل المدت (long term creep) یکی ازمشکل ترین بخش محاسبات دیفلکشن می باشد. کتاب دستی رهنمای پی سی ای (PCI Design Handbook , fifth Edition) بعضی راهنمود های را برای عناصر یک وایهٔ (Simple-Span) در جدول ذیل داده است.

Table 4.8.2 Suggested simple span multipliers to be used as a guide in estimating long –term cambers and deflections for typical prestressed members.

راهنمود ها، در مورد کار برد ضریب ها ی تخمینی انحنای مثبت (cambers) و دیفلکشن بیم ساده کانکریتی پری سترسد

		Without Composite Topping **بدون سلب مختلط**	With Composite Topping **همرا با سلب مختلط**
	At erection **دروقت نصب یا منتاژ عنصر درساختمان**		
1	**مرکبه دیفلکشن (به جهت پائین) - برای دیفلکشن پلاستیکی تحت عمل وزن خود عنصر در وقت انتقال قوه های پری سترس در کانکریت**	1.85	1.85
2	**مرکبه دیفلکشن مثبت یا کمبر (به جهت بالا) برای دیفلکشن پلاستیکی تحت عمل قوه های پری سترس در هنگام انتقال قوه های پری سترس در کانکریت**	1.80	1.80
	Final **نهائی یا آخری**		
3	**مرکبه دیفلکشن (به جهت پائین) - برای دیفلکشن پلاستیکی تحت عمل وزن خود عنصر در وقت انتقال قوه های پری سترس در کانکریت**	2.70	2.40
4	**مرکبه دیفلکشن مثبت یا کمبر (به جهت بالا) برای دیفلکشن پلاستیکی تحت عمل قوه های پری سترس در هنگام انتقال قوه های پری سترس در کانکریت**	2.45	2.20
5	**مرکبه دیفلکشن (به جهت پائین) - برای دیفلکشن پلاستیکی تنها تحت عمل بارمرده بالائي یا سوپرامپوز**	3.0	3.0
6	**مرکبه دیفلکشن (به جهت پائین) - برای دیفلکشن پلاستیکی تنها تحت عمل بارمرده بالائي سلب مقطع مختلط.**	-	2.3

حالا، با استفاده ازمعادله (3)، محاسبه دیفلکشن را برای مثال مورد بحث که طول وایه بیم L=48.5 ft است به ترتیب ذیل ادامه مید هیم:

1- دیفلکشن از اثرقوه پری سترس:

قبلادریافت کرده بودیم که قوه اولی پری سترس:

$$P_i = 1.13\ x\ P = 1.13\ x\ 358.82 = 405.5\ \ kips$$

است ، ازشکل 17 ، فاصله هارپ (a) از انجام بیم 19.4 ft یا :

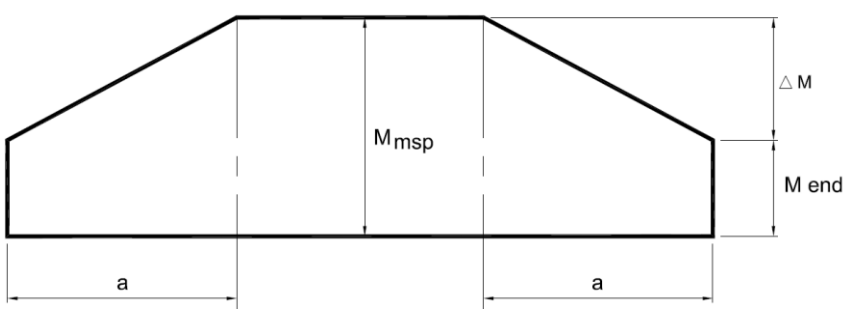
$$a = 0.4\ L = 0.4\ x\ 48.5\ x\ 12 = 232.8\ in$$

نظربه شیپ کیبل های هارپ درشکل 17، دایاگرام مومنت راکه مطابقت به چنین بارگذاری نماید ازجدول دایاگرام ها برای محاسبه دیفلکشن انتخاب می نمائیم که دراین صورت دایاگرام نمبر4 (شکل ذوذنقه) است وکویفیشنتC_Δ که عبارت از: $C_\Delta = \frac{1}{8} - \frac{(a/L)^2}{6}$ است را انتخاب نموده ودرمعادله (3) وضع می کنیم.

$$\Delta = C_\Delta \frac{M\ L^2}{EI}$$

$$\Delta_{ps} = \left(\frac{1}{8} - \frac{(a/L)^2}{6}\right)\frac{M\ L^2}{EI} = \frac{M_{msp}\ L^2}{8\ EI} - \frac{\Delta M\ a^2}{6\ EI}$$

$$M_{msp} = P_i\ e_{msp} = 405.5\ (9) = 3{,}643\ \ kip - in.$$



$$\Delta M = M_{msp} - M_{end} = P_i\ (e_{msp} - e_{end}) = 405.5\ (9-6) = 1{,}217\ kip - in.$$

$$\Delta_1 = \frac{M_{msp}\ L^2}{8\ EI} = \frac{3{,}643\ (338{,}724\ )}{8\ x\ 3{,}824(27{,}000)} = 1.49\ \ in.\uparrow$$

$$\Delta_2 = \frac{\Delta M\ a^2}{6\ EI} = \frac{1{,}217\ (232.8)^2}{6x\ 3{,}824(27{,}000)} = 0.11\ \ \text{in.}\downarrow$$

دفلکشن از اثرقوه پری سترس (+) : $\Delta_{ps} = 1.49 - 0.11 = 1.38\ in.\uparrow$

2- دیفلکشن از اثر وزن عنصر:

دایاگرام مومنت برای وزن خود بیم دارای وایه ساده بشکل پارابولیک (دایاگرام 2) جدول دیاگرام ها برای محاسبه بیفلکشن می باشد و ضریب دیفلکشن $C_\Delta = \frac{5}{48} \approx 1/10$ است. پس دیفلکشن از اثروزن خود عنصر:

$$\Delta_g = C_\Delta \frac{M\,L^2}{EI} = \frac{5}{48} x \frac{1{,}411\ (338{,}724)}{3{,}824\ (27{,}000)} = 0.48\ in.\ \downarrow$$

تفاوت دیفلکشن از اثر قوه پری سترس و وزن خود عنصر بنام (Initial Camber) یا دیفلکشن اولی مثبت یاد می شودوآن:

$$\text{Initial Camber} = \Delta_{ps} - \Delta_g = 1.38\ in.\uparrow - 0.48\ in.\downarrow = 0.90\ in.\ \uparrow$$

3- دیفلکشن از اثر بار مرده یا خوابیده سلب:

$$\Delta_d = \frac{5}{48} x \frac{2{,}646\ (338{,}724)}{4{,}415\ (27{,}000)} = 0.78\ in.\ \downarrow$$

4- دیفلکشن از اثر بار مرده متفرقه(و غیره):

$$\Delta_{dc} = \frac{5}{48} x \frac{1{,}059\ (338{,}724)}{4{,}415\ (80{,}000)} = 0.11\ in.\ \downarrow$$

4- دیفلکشن از اثر بار زنده:

$$\Delta_l = \frac{5}{48} x \frac{2{,}364\ (338{,}724)}{4{,}415\ (80{,}000)} = 0.24\ in.\ \downarrow$$

برای ضریب های دیفلکشن طویل المدت به جدول (5) صفحه بعد مراجعه شود.

Table 5- Apply deflection multipliers for long term effects

جدول (5) کار برد ضریب های دیفلکشن درمدت زمان طولانی.

عمل بار ها	Initial ابتدائی	Erection دروقت نصب		Final آخری	
	Defl خمیده گی یا انحنا	**Mult ضریب**	**Defl خمیده گی یا انحنا**	**Mult ضریب**	**Defl خمیده گی یا انحنا**
Prestress – پری سترس	-1.38	1.80	-2.48	2.20	-3.04
Self Weight وزن خود عنصر	**0.48**	1.85	**0.89**	2.40	**1.15**
Initial Camber کمبر یا انحنای مثبت اولی	-0.90		-1.59		-1.89
Dead load of slab بار مردهٔ سلب			0.78	2.30	1.79
Superimposed dead load on composite بارمردهٔ بالائی مقطع مختلط			0.11	3.00	**0.33**
Final dead load deflection دیفلکشن نهائی بار مرده -1.89+1.79+0.33 =0.23					0.23
Live load بار زنده					**0.24**
Deflection at full service load دیفلکشن تحت عمل کلی سرویس لود 0.23+0.24 = 0.47					0.47

از جدول بالا نیتجه آخری دیفلکشن $0.47 \cong {}^{1}/_{2}\ in$ است.

آیا اینکه محاسبات فوق دیفلکشن چقدرمتیواند دقیق باشد؟ صحت و درستی آن را نمیتوان بصورت صد درصد به حیث نتیجه آخری آنچنان تخمین زد که عملاً دقیق باشد.زیرا نتیجه آخری عبارت از تفاوت چندین مرکبه دیفلکشن می باشد که جمع قیمت های مطلق آنها = 3.04+1.15+1.790+0.33+0.24 6.55 in. است. پس برای تخمین صحت محاسبه میتوان قیمت آخری دیفلکشن را با تخمین $\pm 10\%$ قیمت مطلقه فوق مقایسه نمود که دراین صورت $\pm {}^{5}/_{8}$ in = 0.655 in است این خیلی نزدیک به پیش بینی محاسبوی بالا می باشد .

یاداشت ها و علامه گذاری سمبول ها

در این جا سعی به عمل آمده تا علامه گذاری و سمبول ها کار گرفته در بحث این رساله مطابقت به علامه گذاری کُد های ACI ،UBC و PCI Design Handbook داشته باشد.

a = depth of compressive stress block عمق یا ارتفاع بلاک تشنجات فشاری مقطع

A = Area مساحت

b = Width عرض

C = Compressive force قوه فشاری

C_e = Creep multiplier ضریب خزیدن

C_Δ = Deflection coefficient ضریب خمیده گی یا دیفلکشن

d = depth to centroid of steel force عمق یا ارتفاع تا مرکزثقل قوه فلزیا عنصر آهنی

e = eccentricity of prestressing force اندازهٔ خارج از مرکز بودن قو پری سترس

E = Modulus of elasticity مدول قابلیت ارتجاعی

f = Stress تنش یا تشنج

h = Overall thickness of member ارتفاع کلی مقطع (ضخامت کلی)

I = Moment of inertia مومنت انرشیا

L = Span طول وایه (بین دو اتکا)

M = Bending Moment مومنت انحنا

P = Prestressing force (final after all losses, unless subscripted)

قوهٔ پری سترس (قیمت نهائی بعد از تمام ضایعات ، مگر آنکه تذکر داده شود)

s = Spacing فاصله

S = Section modulus مدول مقطع

T = Tensile force قوهٔ کششی

v = Shear stress تنش یا تشنج برشی

V = Shear force قوه برش

w = Load per unit length بار در واحد طول

y = Vertical Distance فاصلهٔ عمودی

β_1 = See UBC 1910.2.7.3, $\beta_1 = 0.85\ for\ 3000\ psi\ concrete$

ضریبی که 0.85 برای کانکریت مقاومت 3000 psi می باشد

γ_1 = A factor equal to 0.28 for low-relaxation strand

فکتوری که مساوی به 0.28 برای کیبل پری سترس دارای سستی پائین می باشد.

Δ = Change in stress, or deflection تغییر در تنش (تشنج)، یا خمیده گی (دیفلکشن)

ρ = Steel percentage فیصدی فولاد (آهن) یا فلز

Σ = Sum مجموع

Φ = Capacity reduction factor فکتور تقلیل توانائی یا کنجایش

ω = see UBC 1918.0 UBC 1918.0 دیده شود.

زیرنوشته های سمبول ها:

allowable = مجاز

b = bottom پایین

c = concrete, when applied to stresses کانکریت، دروقت کاربرد آن برای تنش یا تشنج

c = composite, when applied to section properties مختلط، دروقت کاربرد آن برای دارائی ها مقطع

cg = center of gravity مرکز ثقل

d = superimposed dead load بارمازاد مرده

e = effective, when applied to stress موثریت ، وقتیکه کاربرد آن برای تشنج یا تنش باشد

end = end انجام

g = self weight وزن خودی یا وزن عنصر

i = initial (at release of prestress), when applied to stresses

اولی یا ابتدائی (دروقت انتقال قوه پری استرس) ، درصورتی‌که کار برد آن برای تنش باشد.

i = interface, when applied to section properties

خط فاصل بین دو نوع کانکریت، درصوتیکه برای دارائی ها کانکریت استفاده شود

l = live load بار زنده

msp = midspan وسط وایه

n = nominal strength as defined in Chapter 2 of the ACI cod

مقاوت نامینال طوریکه در فصل دوم کُد ACI تعریف شده

p = prestress پری سترس

req'd = required مستلزم یا لازمی بودن

s = steel فولاد یا به اصطلاح قبول شده افغانستان آهن

t = tension, when applied to stresses کشش ، در صورت کاربرد آن برای سترس یا تنش دادن

t = top, when applied to section properties بالا ، وقتیکه کاربرد آن برای دارائی های مقطع باشد

u = ultimate (factored load) نهائی (بار های فکتورشده)

w = web تنه

y = yield واگذاری یا تسلیمی

1,2 = used for component parts برای اجزا یا حصه ها استفاده شده

سر نوشته های سمبول ها:

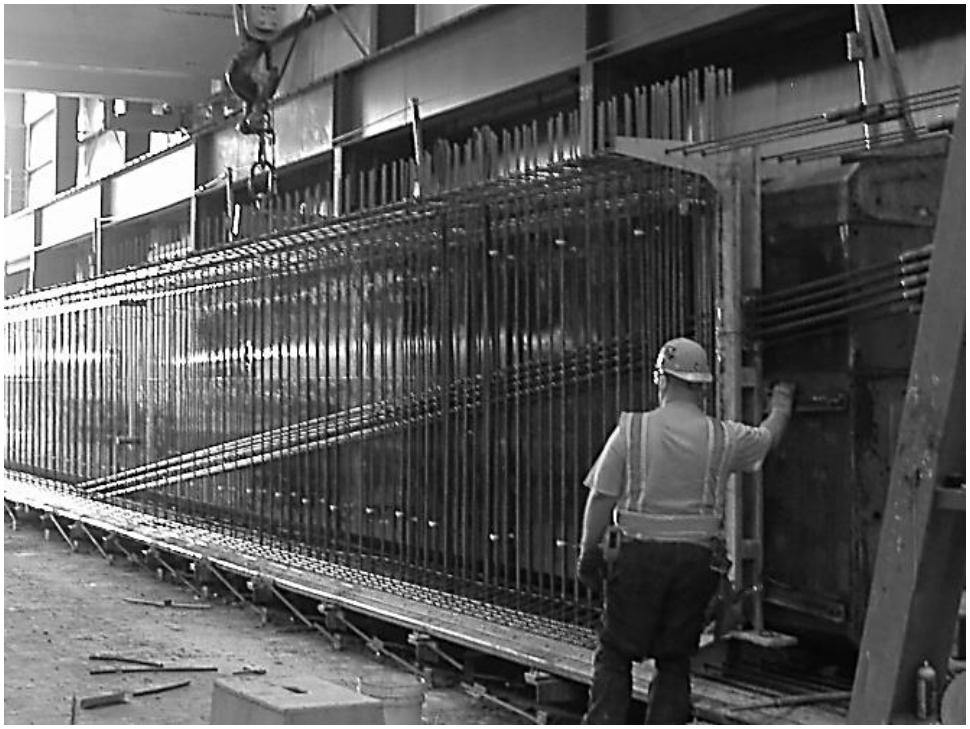
' = ultimate or cylinder strength واگذاری یا تسلیمی یا مقاومت استوانهٔ

+ = positive (moment) مومنت مثبت

- = negative (moment) مومنت منفی

↑ = positive deflection دیفلکشن مثبت بطرف بالا

↓ = negative deflection دیفلکشن منفی بطرف پایین



جریان بسته کاری یک گادربا مقطع I وکیبل های هارپ (Harp)