به نام خدا

پروژه ترجمه صفحات 83 تا 100 کتاب ""

جواد پورنصرت

زمستان 1400

فصل چهارم

طراحی و تحلیل تیر های خمشی

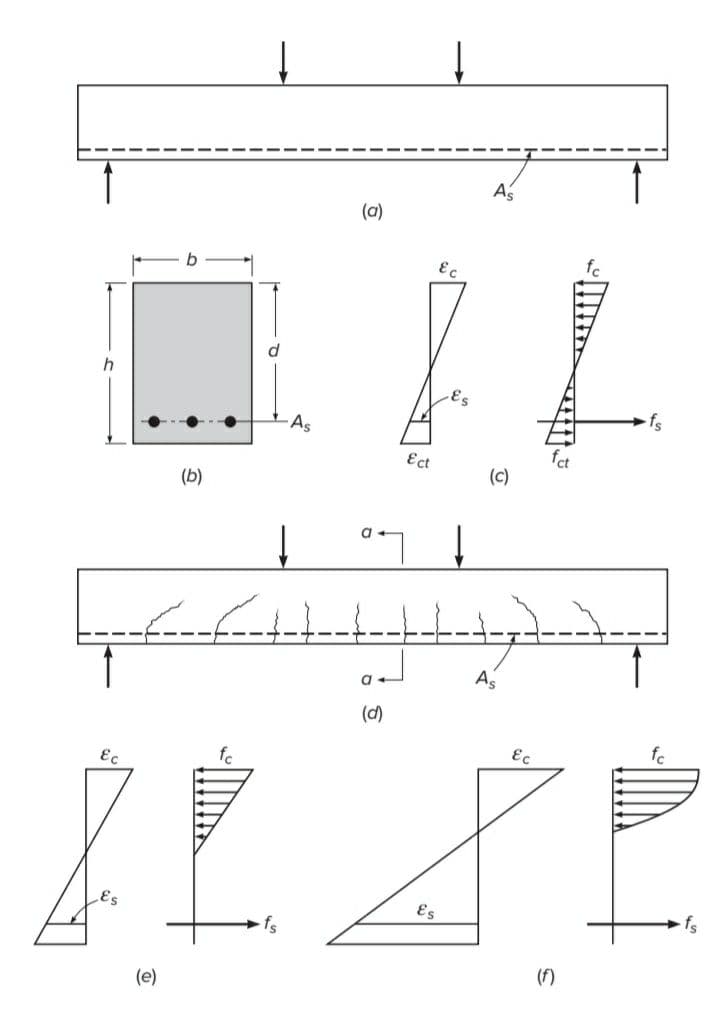
۴-۱ مقدمه

فرضیات اساسی تحلیل و طراحی اعضای بتن آرمه که در بخش ۴-۳ معرفی شدند و کاربرد آن فرضیات در مورد بارگذاری ساده محوری در بخش ۵-۳ توضیح داده شده است. خمش تیر‌های همگن در بخش ۶-۳ توضیح داده شده است. و در حال حاضر دانشجو باید بخش های ۴-۳و ۵-۳و ۶-۳ را برای توسعه روش هایی برای تجزیه و تحلیل و طراحی تیر ها در این فصل مرور کند زیرا در این فضل از همان فرضیات و مفاهیم استفاده خواهد شد. این فصل شامل تجزیه و تحلیل برای خمش, از جمله ابعاد صلب بتنی و انتخاب و قرار دادن فولاد تقویت کننده است. سایر جنبه های مهم طراحی تیر, از جمله تقویت برشی، اتصال و لنگر تیر تقویت کننده و و سوالات مهم قابلیت استفاده(به عنوان مثال، محدود کردن انحرافات و کنترل ترک خوردگی بتن) در فصل های 5، 6 و 7 بررسی خواهد شد.

۴-۲ رفتار تیرهای بتن آرمه

تیرهای بتنی ساده به عنوان اعضای خمشی ناکارآمد هستند زیرا استحکام کششی در خمش (مدول گسیختگی، به بخش 2.9 مراجعه کنید) کسری کوچک از مقاومت فشاری است. به عنوان یک نتیجه, چنین تیرهایی در سمت کشش در بارهای کم مدتها قبل از کار می افتند از مقاومت بتن در سمت فشاری به طور کامل استفاده شده است. به همین دلیل, میلگردهای تقویت کننده فولادی در سمت کشش نزدیک به منتهی الیه با حفاظت مناسب در برابر آتش و خوردگی فولاد قرار می گیرند. در چنین تیر بتن مسلحی, تنش ناشی از لحظات خمشی عمدتا توسط آرماتور فولادی تحمل می شود, در حالی که بتن به تنهایی معمولاً قادر است در برابر فشار مربوطه مقاومت کند. اگر از لغزش نسبی جلوگیری شود، چنین عمل مشترک دو ماده تضمین می شود. این امر با استفاده از میلگردهای تغییر شکل یافته با استحکام باند بالا در سطح مشترک فولاد و بتن (بخش 2.14 را ببینید) و در صورت لزوم، توسط لنگر مخصوص انتهای میله ها حاصل می شود. یک مثال ساده از چنین تیرهایی با نامگذاری مرسوم برای ابعاد مقطع، در شکل 4.1 نشان داده شده است. برای سادگی، بحث زیر به تیرهای با مقطع مستطیلی می پردازد، حتی اگر اعضای دیگر اشکال در اکثر سازه های بتنی بسیار رایج هستند. ارتفاع تیر در شکل 4.1a نشان داده شده است. شکل 4.1b مقطع تیر را نشان می دهد، به دنبال آن توزیع کرنش و تنش های مربوطه بر روی مقطع در شکل 4.1c اعمال می شود. این نمایش مقطع تیر و به دنبال آن توزیع کرنش و تنش در سراسر این متن استفاده شده است.

هنگامی که بار روی چنین تیری به تدریج از صفر به بزرگی افزایش می یابد که باعث از کار افتادن تیر می شود، چندین مرحله مختلف رفتار را می توان به وضوح تشخیص داد.



شکل ۱-۴

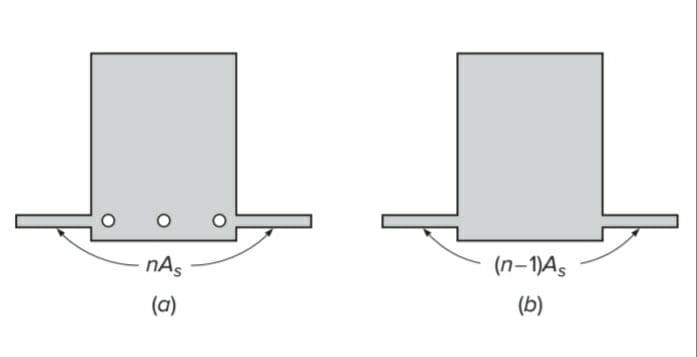
(رفتار تیر بتن آرمه تحت افزایش بار.)

متمایز در بارهای کم، تا زمانی که حداکثر تنش کششی در بتن از مدول گسیختگی کمتر باشد، کل مقطع بتن در مقاومت در برابر تنش، در فشار در یک طرف و در کشش در طرف دیگر محور خنثی مؤثر است. علاوه بر این، آرماتورها که به همان میزان بتن مجاور تغییر شکل می دهند، تحت تنش های کششی نیز قرار دارند. در این مرحله تمام تنش‌های بتن دارای مقدار کمی بوده و متناسب با کرنش‌ها هستند. توزیع کرنش ها و تنش ها در بتن و فولاد بر روی عمق مقطع در شکل 4.1c نشان داده شده است. با افزایش بیشتر بار، مقاومت کششی بتن به زودی حاصل می شود و در این مرحله ترک های کششی ایجاد می شود. اینها به سرعت به سمت بالا یا نزدیک به سطح محور خنثی منتشر می شوند که به نوبه خود با ترک پیشرونده به سمت بالا جابه جا می شوند. شکل کلی و توزیع این ترک های کششی در شکل 4.1d نشان داده شده است. در تیرهایی که به خوبی طراحی شده اند، عرض این ترک ها به قدری کم است (ترک های مویی) که از نظر حفاظت در برابر خوردگی و ظاهر ایرادی ندارند. با این حال، وجود آنها عمیقاً بر رفتار تیر تحت بار تأثیر می گذارد. در یک مقطع ترک خورده، یعنی در مقطعی که در شکافی مانند a-a در شکل 4.1d واقع شده است، مناسب است که بتن را بدون تنش کششی در نظر گرفت. از این رو، همانطور که در اعضای کششی (بخش 3.5b)، از فولاد خواسته می شود تا در برابر کل کشش مقاومت کند. در بارهای متوسط، اگر تنش‌های بتن تقریباً از fc ∕2 تجاوز نکند، تنش‌ها و کرنش‌ها همچنان متناسب هستند (شکل 3.3 را ببینید). توزیع کرنش ها و تنش ها در یا نزدیک یک بخش ترک خورده همان چیزی است که در شکل 4.1e نشان داده شده است. هنگامی که بار همچنان بیشتر افزایش می یابد، تنش ها و کرنش ها به ترتیب افزایش می یابند و دیگر متناسب نیستند. رابطه غیر خطی متعاقب بین تنش ها و کرنش ها همان است که توسط منحنی تنش-کرنش بتن ارائه می شود. بنابراین، همانطور که در تیرهای همگن (نگاه کنید به شکل 3.5)، توزیع تنش های بتن در سمت فشاری تیر به همان شکل منحنی تنش-کرنش است. شکل 4.1f توزیع کرنش ها و تنش ها را نزدیک به بار نهایی نشان می دهد. در نهایت به ظرفیت حمل تیر می رسد. شکست می تواند به یکی از دو روش ایجاد شود. هنگامی که مقادیر نسبتاً متوسطی از آرماتورها استفاده می شود، در مقداری از بار، فولاد به نقطه تسلیم خود می رسد. در این تنش، آرماتور به طور ناگهانی تسلیم می شود و به مقدار زیادی کشیده می شود (شکل 2.19 را ببینید)، و ترک های کششی در بتن به طور قابل مشاهده گسترده شده و به سمت بالا منتشر می شوند، با انحراف قابل توجه تیر به طور همزمان. وقتی این اتفاق می‌افتد، کرنش‌ها در ناحیه فشار باقی‌مانده بتن به حدی افزایش می‌یابد که له شدن بتن، شکست فشاری ثانویه، با باری کمی بزرگ‌تر از باری که باعث تسلیم فولاد شده است، رخ می‌دهد. بنابراین، به طور موثر، رسیدن به نقطه تسلیم در فولاد، ظرفیت حمل تیرهای با تقویت متوسط را تعیین می کند. چنین شکست تسلیم تدریجی است و قبل از آن علائم قابل مشاهده پریشانی، مانند عریض شدن و طولانی شدن ترک ها و افزایش قابل توجه در انحراف وجود دارد.

از سوی دیگر، اگر مقادیر زیادی آرماتور یا مقادیر معمولی فولاد با مقاومت بسیار بالا استفاده شود، ممکن است مقاومت فشاری بتن قبل از شروع تسلیم شدن فولاد به پایان برسد. وقتی کرنش‌ها آنقدر بزرگ می‌شوند که یکپارچگی بتن را مختل می‌کنند، بتن با خرد شدن از بین می‌رود. معیارهای دقیقی برای این رخداد هنوز مشخص نشده است، اما مشاهده شده است که تیرهای مستطیلی در فشار زمانی که کرنش های بتن به مقادیر 0.003 تا 0.004 می رسند، شکست می خورند. شکست فشاری از طریق خرد شدن بتن ناگهانی است، ماهیت تقریباً انفجاری دارد و بدون هشدار رخ می دهد. به همین دلیل، عمل خوبی است که تیرها را به گونه ای ابعاد دهیم که در صورت بارگذاری بیش از حد، شکست با تسلیم فولاد به جای خرد کردن بتن آغاز شود. تجزیه و تحلیل تنش ها و استحکام در مراحل مختلف که توضیح داده شد در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می گیرد.

الف: تنش های کشسان و بخش بدون ترک

تا زمانی که تنش کششی در بتن کوچکتر از مدول گسیختگی باشد، به طوری که هیچ ترک تنشی ایجاد نشود، توزیع کرنش و تنش همانطور که در شکل 4.1c نشان داده شده است، اساساً مانند تیر الاستیک و همگن است (شکل 3.5b). تنها تفاوت وجود ماده تقویت کننده فولادی است. همانطور که در بخش 3.5a نشان داده شده است، در محدوده الاستیک، برای هر مقدار معینی از کرنش، تنش در فولاد n برابر تنش بتن است [معادل. (3.1)]. در همان بخش نشان داده شد که می توان این واقعیت را در محاسبات با جایگزینی مقطع واقعی فولاد و بتن با مقطع ساختگی که تنها از بتن تصور می شود، در نظر گرفت. در این "بخش تبدیل شده"، منطقه واقعی آرماتور با یک منطقه بتنی معادل برابر با nAs واقع در سطح فولاد جایگزین می شود. بخش تبدیل شده و بدون ترک مربوط به تیر شکل 4.1b در شکل 4.2 نشان داده شده است.

شکل 4.2

بخش تیر تبدیل نشده ترک خورده.

دایره های شکل 4.2a نشان دهنده آرماتورهایی است که برداشته شده و با سطح معادل بتن جایگزین شده است. اغلب راحت است که از نمایش نشان داده شده در شکل 4.2b استفاده کنید، و عضو را به عنوان یکپارچه در داخل مرزهای اصلی خود در نظر بگیرید و در عین حال یک مساحت معادل بتن برابر با (n-1)As اضافه کنید.

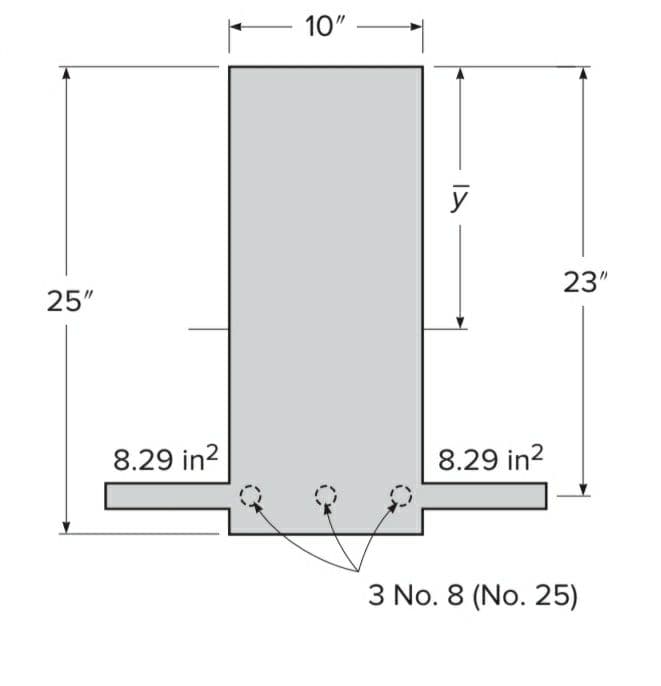
هنگامی که مقطع تبدیل شده به دست آمد، روش های معمول آنالیز تیرهای همگن الاستیک اعمال می شود. یعنی خصوصیات مقطع (موقعیت محور خنثی، ممان اینرسی، مدول مقطع و غیره) به روش معمول محاسبه می شود و به ویژه تنش ها با معادله ها محاسبه می شوند. (3.11) تا (3.13).

مثال ۱-۴

یک تیر مستطیلی دارای ابعاد (نگاه کنید به شکل 4.3) b = 10 اینچ، h = 25 اینچ، و d = 23 اینچ است و با سه میله شماره 8 (شماره 25) تقویت شده است به طوری که A s = 2.37 است. در 2 . مقاومت فشاری بتن fc 4000 psi و مقاومت کششی در خمش (مدول گسیختگی) psi 475 است. نقطه تسلیم فولاد f y 60000 psi است، منحنی های تنش-کرنش مواد در شکل 3.3 است. تنش های ناشی از یک لنگر خمشی M = 45 را برحسب ft-kips تعیین کنید

پاسخ: با مقدار n = E s   ∕ E c = 29,000,000 ∕ 3,600,000 = 8، باید به طرح مستطیلی یک مساحت اضافه کرد (n − 1) A s = 7 × 2.37 = 16.59 در 2 و توزیع آن به شکل کمی گرد است. شکل 4.3، برای به دست آوردن بخش بدون ترک، تبدیل شده است. محاسبات متعارف نشان می دهد که محل محور خنثی این مقطع با y = 13.2 اینچ از بالای مقطع بدست می آید و ممان اینرسی آن در مورد این محور 14740 در 4 است. برای M = 45 فوت-کیپس = 540000 اینچ پوند، تنش فشاری بتن در فیبر بالایی از معادله است. (3.11)

فرمول



شکل 4.3

بخش تیر تبدیل شده از مثال 4.1.

و به طور مشابه، تنش کششی بتن در فیبر پایین، 11.8 اینچ از محور خنثی، است.

فرمول

از آنجایی که این مقدار کمتر از مقاومت خمشی کششی داده شده بتن، psi 475 است، هیچ ترک کششی ایجاد نخواهد شد و محاسبه با مقطع تبدیل نشده و ترک خورده موجه است. تنش در فولاد، از معادله. (3.1) و (3.11)، است

فرمول

با مقایسه fc و fs به ترتیب با مقاومت سیلندر بتن و نقطه تسلیم، مشاهده می شود که در این مرحله تنش های واقعی در مقایسه با مقاومت های موجود دو ماده بسیار کوچک است.

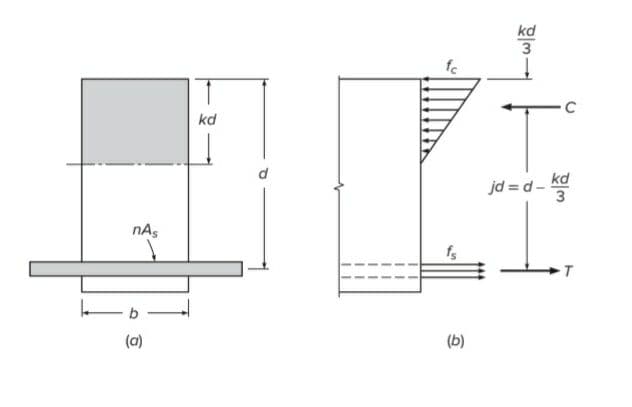
ب: تنش های الاستیک و برش ترک خورده

هنگامی که تنش کششی f ct از مدول گسیختگی تجاوز می کند، ترک ها شکل می گیرند، همانطور که در شکل 4.1d نشان داده شده است. اگر تنش فشاری بتن تقریباً کمتر از \_ 1 2 f c ′ باشد و تنش فولاد به نقطه تسلیم نرسیده باشد، هر دو ماده به رفتار کشسان یا تقریباً نزدیک ادامه می دهند. این وضعیت عموماً در سازه‌ها تحت شرایط سرویس و بارهای معمولی رخ می‌دهد، زیرا در این بارها تنش‌ها عموماً از مرتبه‌ای هستند که در مورد آن بحث شد. در این مرحله برای سادگی و با خطای کم، فرض بر این است که ترک‌های کششی تا محور خنثی پیشروی کرده‌اند و صفحه مقاطع قبل از خمش در عضو تغییر شکل‌یافته صاف هستند. وضعیت با توجه به توزیع کرنش و تنش همان است که در شکل 4.1e نشان داده شده است.

برای محاسبه تنش ها و کرنش ها در صورت تمایل، همچنان می توان از دستگاه مقطع تبدیل شده استفاده کرد. فقط باید این واقعیت را در نظر گرفت که تمام بتن هایی که تحت تنش قرار می گیرند ترک خورده فرض می شوند و بنابراین به طور موثر وجود ندارند. همانطور که در شکل 4.4a نشان داده شده است، سپس بخش تبدیل شده از بتن تحت فشار در یک طرف محور و n برابر مساحت فولاد در طرف دیگر تشکیل شده است.

فاصله تا محور خنثی در این مرحله معمولاً به صورت کسری kd از عمق مؤثر d بیان می شود. (زمانی که بتن ترک خورد، هر ماده ای که در زیر فولاد قرار گرفته باشد، بی اثر است، به همین دلیل d عمق موثر تیر است.) برای تعیین محل محور خنثی، ممان ناحیه کشش حول محور برابر تعیین می شود. به لحظه منطقه فشرده سازی، که می دهد.

فرمول



شکل 4.4

بخش تبدیل شده ترک خورده و تنش های وارد بر مقطع.

با به دست آوردن kd با حل این معادله درجه دوم، می توان گشتاور اینرسی و سایر خواص مقطع تبدیل شده را مانند مورد قبل تعیین کرد. از طرف دیگر، می‌توان از اصول اولیه با در نظر گرفتن مستقیم نیروهایی که بر سطح مقطع عمل می‌کنند، اقدام کرد. اینها در شکل 4.4b نشان داده شده است. تنش بتن، با حداکثر مقدار f c در لبه بیرونی، مطابق شکل به صورت خطی توزیع می شود. کل سطح فولاد A s تحت تنش f s قرار دارد. به همین ترتیب، کل نیروی فشار C و نیروی کشش کل T:

فرمول

شرط مساوی بودن این دو نیرو از نظر عددی با نحوه تعیین موقعیت محور خنثی رعایت شده است. تعادل مستلزم آن است که زوج تشکیل شده توسط دو نیروی C و T از نظر عددی با لنگر خمشی خارجی M برابر باشد. بنابراین، گرفتن ممان در مورد نتیجه فشرده سازی C :

فرمول

که در آن jd بازوی اهرمی داخلی بین C و T است. از معادله. (4.3)، تنش فولاد:

فرمول

برعکس، گرفتن لحظاتی در مورد نیروی کشش T می دهد

فرمول

که تنش بتن نیز برابر است با:

فرمول

در استفاده از معادلات از (4.2) تا (4.6)، برای تعیین فاصله محور خنثی kd و بازوی اهرمی داخلی jd، داشتن معادلاتی که با آن k و j را می توان مستقیماً یافت، راحت است. ابتدا نسبت تقویت را به صورت تعریف می کنیم

فرمول

سپس A s = ρbd را به معادله جایگزین کنید. (4.1) و با حل k به دست می آید:

فرمول

از شکل 4.4b مشاهده می شود که jd = d − kd∕3، یا:

فرمول

مقادیر k و j برای تجزیه و تحلیل بخش ترک خورده الاستیک، برای نسبت‌های رایج تقویت‌کننده و نسبت‌های مدولار، در جدول A.6 پیوست A آمده است.

مثال 4.2

تیر مثال 4.1 تحت یک لنگر خمشی M = 90 فوت-کیپس (به جای 45 فوت-کیپس مانند قبل) است. خواص و تنش های مربوطه را محاسبه کنید.

پاسخ:

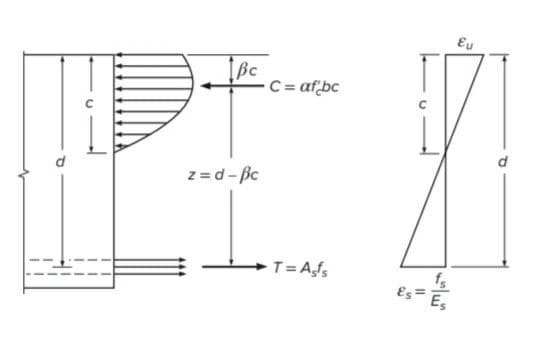
اگر مقطع بدون ترک باقی می ماند، اکنون تنش کششی در بتن دو برابر مقدار قبلی آن یعنی 864 psi خواهد بود. از آنجایی که این مقدار بسیار بیشتر از مدول گسیختگی بتن داده شده (475 psi) است، ترک هایی ایجاد می شود و تجزیه و تحلیل باید مطابق با شکل 4.4 باشد. معادله (4.1)، با درج کمیت های شناخته شده b، n، و As، فاصله تا محور خنثی kd = 7.6 اینچ، یا k = 7.6∕23 = 0.33 را نشان می دهد. از معادله (4.9)، j = 1 - 0.33∕3 = 0.89. با این مقادیر تنش فولاد از معادله به دست می آید. (4.4) به عنوان fs = 22300 psi، و حداکثر تنش بتن از معادله. (4.6) به صورت f c = 1390 psi.

با مقایسه نتایج با مقادیر مربوطه برای همان پرتو وقتی که تحت یک دوم ممان قرار داشت، همانطور که قبلا محاسبه شد، متوجه می‌شویم که (1) محور خنثی به سمت بالا حرکت کرده است به طوری که فاصله آن از فیبر بالایی از 13.2 به 7.6 تغییر کرده است. که در.؛ (2) اگرچه ممان خمشی فقط دو برابر شده است، تنش فولاد از 2870 به 22300 psi یا حدود 7.8 برابر افزایش یافته است، و تنش فشاری بتن از 484 به 1390 psi یا 2.9 برابر افزایش یافته است. (3) ممان اینرسی بخش تبدیل شده ترک خورده به راحتی 5910 در 4 محاسبه می شود، در مقایسه با 14740 در 4 برای بخش بدون ترک. این امر بر میزان انحراف، همانطور که در فصل 7 بحث شد، تأثیر می‌گذارد. بنابراین، مشاهده می‌شود که تأثیر تشکیل ترک‌های کششی بر رفتار تیرهای بتن مسلح چقدر اساسی است.

ج :استحکام خمشی

محاسبه آن تنش ها و تغییر شکل هایی که در سازه در حال سرویس تحت بار طراحی رخ می دهد، در عمل سازه ای مورد توجه است. برای تیرهای بتن مسلح، این کار را می توان با روش هایی که اخیراً ارائه شد انجام داد، که رفتار الاستیک هر دو ماده را فرض می کند. به همان اندازه، اگر نه بیشتر، مهم است که مهندس سازه بتواند با دقت رضایت بخشی مقاومت یک سازه یا عضو سازه را پیش بینی کند. با بزرگتر کردن این مقاومت به میزان مناسبی نسبت به بزرگترین بارهای قابل انتظار در طول عمر سازه، حاشیه ایمنی کافی تضمین می شود. از نظر تاریخی، روش‌های مبتنی بر آنالیز الاستیک، مانند روش‌هایی که اخیراً ارائه شده یا تغییرات آن‌ها، برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، واضح است که در بار نهایی یا نزدیک به آن، تنش ها دیگر متناسب با کرنش ها نیستند. در مورد تراکم محوری، این موضوع در بخش 3.5 به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است، و در مورد خمش، اشاره شده است که در بارهای زیاد، نزدیک به شکست، توزیع تنش ها و کرنش ها مانند شکل 4.1 است. f به جای توزیع الاستیک شکل 4.1e. روش‌های واقعی‌تر تحلیل، مبتنی بر رفتار غیرکشسان واقعی به جای رفتار الاستیک فرضی مواد و بر اساس نتایج تحقیقات تجربی بسیار گسترده، برای پیش‌بینی استحکام اعضا ایجاد شده‌اند. آنها در حال حاضر تقریبا به طور انحصاری در عمل طراحی سازه استفاده می شوند.

اگر توزیع تنش های فشاری بتن در بار نهایی یا نزدیک به بار نهایی (شکل 4.1f) دارای یک شکل کاملاً مشخص و ثابت سهمی، ذوزنقه ای یا غیره باشد، می توان یک نظریه کاملاً منطقی از مقاومت خمشی به دست آورد، همانطور که نظریه خمش الاستیک با شکل مثلثی شناخته شده توزیع تنش (شکل های 3.5b و 4.1c و e) ساده و منطقی است. در واقع، بازرسی از انجیر. 2.3، 2.4، و 2.6، و بسیاری از منحنی های تنش تنش بتن دیگری که منتشر شده است، نشان می دهد که شکل هندسی توزیع تنش بسیار متنوع است و به عوامل متعددی مانند مقاومت سیلندر و سرعت و مدت زمان بستگی دارد. بارگذاری. به این دلیل و دلایل دیگر، یک نظریه خمشی کاملاً منطقی برای بتن مسلح هنوز ایجاد نشده است (مراجعات 4.1 تا 4.3). بنابراین، روش‌های کنونی آنالیز تا حدی بر اساس قوانین شناخته شده مکانیک هستند و در صورت نیاز با اطلاعات آزمایشی گسترده تکمیل می‌شوند.



شکل 4.5

توزیع تنش و کرنش در بار نهایی.