

تحلیل رفتار تیرهای عمیق با بتن مقاومت بالا تحت بار گسترده

رضا آقایی^۱، ابوالفضل عربزاده^۲، کیانا زنگنه زاده^۳

۱. استادیار گروه عمران، دانشگاه رازی

۲. دانشیار گروه سازه، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه رازی

reza_agh@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۳۰]

چکیده - در این مقاله رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح با مقاومت بالا به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور ۵ نمونه تیر عمیق بتن مسلح با مقاومت فشاری ۶۰ MPa تحت اثر بار گسترده مورد آزمایش قرار گرفت. تیرهای آزمایشگاهی در دو انتها دارای تکیه‌گاه ساده و با آرماتورهای برشی قائم به فواصل مساوی تقویت شده بودند. آرایش آرماتورهای برشی نمونه‌ها یکسان ولی قطر آنها متفاوت بود. مشاهده آزمایشگاهی شامل تغییر شکل وسط دهانه، وضعیت شکست، حالت‌های گسیختگی و مقاومت فشاری مانند ترک‌خوردگی اولیه و شکست نهایی نمونه تیر عمیق بود. گسیختگی ۳ نمونه به صورت شکست برشی و دو نمونه به صورت موضعی بود. بر اساس نتایج به دست آمده، آرماتورهای قائم جان بر ظرفیت برشی تیرهای عمیق تأثیرگذار بوده و نمونه‌ها تحت بار گسترده عموماً مقاومت برشی بالاتری در مقایسه موارد مشابه تحت بار متمرکز از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از روش (Strut-and-tie) مدل خرپایی مقایسه شد. نتایج حاکی از هماهنگی رضایت بخش مدل STM ارائه شده برای تیرهای عمیق بتن مسلح تحت بار گسترده با نتایج آزمایشگاهی است.

کلمات کلیدی: تیر عمیق؛ مدل خرپایی؛ مقاومت برشی؛ آرماتور برشی؛ بارگذاری گسترده

۱- مقدمه

بررسی و شناسایی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح به عنوان یکی از اعضای مهم سازه‌ای با نسبت دهانه به ارتفاع کوچک یکی از متداول‌ترین موضوعات مفید در زمینه سازه‌های بتن مسلح است.

در تیرهای عمیق، بسته به نسبت عمق موثر به دهانه برشی و مساحت آرماتور برشی جان، در صورتی که آرماتور با طولی کافی استفاده شده باشد، مقاومت نهایی به طور کلی به وسیله نیروی برشی کنترل می‌شود. با توجه به نتایج تجربی به دست آمده، این اعضا معمولاً در مودهای مختلفی دچار گسیختگی می‌شوند که به علت تغییر پذیری در گسیختگی، تعیین مقاومت برشی و شناسایی چگونگی گسیختگی آنها از پیچیدگی بالایی برخوردار است [۱].

روش خرپایی (STM) یکی از روش‌های ساده و کاربردی است که می‌توان برای ساده‌سازی تحلیل و طراحی تیرهای عمیق به کار برد. تاکنون برنامه‌های پژوهشی متنوعی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرهای عمیق انجام گرفته است، به عنوان نمونه Siao [۲] مقاومت برشی دیوارها، کربل‌ها و تیرهای عمیق بتن مسلح کوتاه را بررسی کردند.

مدل خرپایی اولین بار به وسیله Ritter [۳] معرفی شد که بعدها به وسیله Morsch [۳]، Schafer Scaalich & [۴]،

Marti [۵]، Mitchell-Collins [۶] و Rameriz [۷]

اصلاحاتی برای ساده‌سازی و افزایش دقت آن صورت گرفت. Tan و همکاران [۸]، Kong و همکاران [۹]، Oh و همکاران [۱۰] نیز گزارش‌های پژوهشی متنوعی در زمینه تأثیر آرماتورهای برشی جان و چگونگی آرایش آنها منتشر کردند.

نمود. مطالعات تجربی صورت گرفته بیشتر به منظور بررسی تاثیر آرماتور جان بر رفتار برشی تیرهای عمیق انجام شده اند که هدف اصلی این مقاله شامل شناسایی رفتار و مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح و نیز ارزیابی دقت روش خرابایی می شود. پارامتر متغیر در آزمایشها نیز مساحت آرماتورهای برشی است. برنامه آزمایشگاهی ارائه شده در این مقاله به منظور تکمیل مطالعات تجربی صورت گرفته در مرجع انجام شده است

۲- برنامه آزمایشات

۲-۱- جزئیات نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی شامل ۵ تیر عمیق با تکیه گاه های ساده با ابعاد $400 \times 800 \text{ mm}$ ، طول خالص 1200 mm و طول کلی 1600 mm بودند. در ساخت این نمونه ها از آرماتورهای برشی قائم به قطر 6 mm با فواصل یکسان و تعداد مختلف استفاده شد. نمونه های ساخته شده مساوی تحت بار گسترده آزمایش شدند. در شکل ۱ و جدول ۱ اطلاعات و شمای کلی نمونه ها ارائه می شود.

عربزاده در سال ۲۰۰۱ [۱۱]، عربزاده و همکاران [۱۲] نیز در سال ۲۰۰۹ مدل های خرابایی توسعه یافته ای را برای پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح پیشنهاد نمودند. در استاندارد کانادایی CSA [۱۳] نیز یک روش مشابه بر اساس نظریه اصلاح شده میدان فشاری (MCFT) و مدل خرابایی ارائه شده است. همچنین در نسخه های اخیر آیین نامه ACI [۱۴] نیز مدل خرابایی به عنوان یکی از روش های جایگزین طراحی به پیوست A افزوده شده است. روش های معمول تحلیل طراحی تیرهای عمیق شامل مدل های تجربی و شبه تجربی بوده که در بیشتر آیین نامه ها شرح داده شده اند. البته این روش ها معمولاً برای بتن های با مقاومت معمولی (NSC) کاربرد داشته که به منظور افزایش کارایی آنها، این روش ها باید برای بتن های با مقاومت بالا (HSC) نیز تعمیم داده شوند.

تاکنون موارد معدودی به عنوان پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرهای عمیق شناسایی شده اند که از جمله آنها می توان به مقاومت فشاری بتن، نسبت دهانه به ارتفاع، مساحت و چگونگی آرایش آرماتور برشی و میزان آرماتور اصلی اشاره

شکل ۱- جزئیات نمونه های آزمایشگاهی

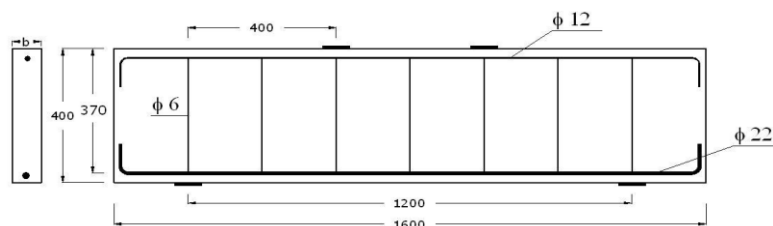


Fig.1. Detailing of specimens

جدول ۱- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی (mm)

| نمونه ها | b (mm) | d (mm) | h (mm) | L _n (mm) | L (mm) | a (mm) | آرماتور فوقانی | | آرماتور تحتانی | | f _c (Mpa) | آرماتور جان | |
|----------|--------|--------|--------|---------------------|--------|--------|----------------|--------|----------------|-------|----------------------|--------------------|-------|
| | | | | | | | تعداد | ρ' (%) | تعداد | ρ (%) | | ρ _v (%) | تعداد |
| E-۱ | ۸۰ | ۳۷۰ | ۴۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۶۰۰ | ۴۰۰ | φ۱۲ | ۰/۴ | φ۲۲ | ۱/۳۲ | ۶۰ | ۰ | — |
| E-۲ | ۸۰ | ۳۷۰ | ۴۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۶۰۰ | ۴۰۰ | φ۱۲ | ۰/۴ | φ۲۲ | ۱/۳۲ | ۶۰ | ۰/۱۸ | ۶φ۶ |
| E-۳ | ۸۰ | ۳۷۰ | ۴۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۶۰۰ | ۴۰۰ | φ۱۲ | ۰/۴ | φ۲۲ | ۱/۳۲ | ۶۰ | ۰/۲۹ | ۱۰φ۶ |
| E-۴ | ۸۰ | ۳۷۰ | ۴۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۶۰۰ | ۴۰۰ | φ۱۲ | ۰/۴ | φ۲۲ | ۱/۳۲ | ۶۰ | ۰/۴۷ | ۱۶φ۶ |
| E-۵ | ۸۰ | ۳۷۰ | ۴۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۶۰۰ | ۴۰۰ | φ۱۲ | ۰/۴ | φ۲۵ | ۱/۳۲ | ۶۰ | ۰/۶۲ | ۲۱φ۶ |

Table.1. The tasted specimens characteristics

جدول ۲- مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی مصرف شده

| قطر | φ۲۵ | φ۲۲ | φ۱۲ | φ۶ |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| F_y (تنش تسلیم - N/mm^2) | ۵۷۷ | ۵۸۵ | ۴۳۳ | ۳۹۷ |
| F_u (تنش نهایی - N/mm^2) | ۵۷۷ | ۵۸۹ | ۴۹۱ | ۴۶۹ |
| E (مدول ارتجاعی - N/mm^2) | ۲۰۴۰۰۰ | ۲۰۲۲۰۰ | ۱۹۹۲۰۰ | ۲۰۰۰۰۰ |
| ϵ_y (%) (کرنش تسلیم) | ۰/۲۹ | ۰/۳۰ | ۰/۲۲ | ۰/۲۰ |
| ϵ_u (%) (کرنش نهایی) | ۲۷/۱ | ۲۶/۳ | ۲۰/۰۰ | ۹/۷۰ |

Table 2. Mechanical properties of used steel bars

۲-۲- مشخصات مصالح

آرماتورهای فولادی طولی نمونه‌ها شامل میلگردهای فولادی آجدار φ۱۲ (قطر ۱۲ mm)، φ۲۲ (قطر ۲۲ mm) و φ۲۵ (قطر ۲۵ mm) و آرماتورهای برشی نمونه‌ها نیز شامل میلگردهای بدون آج φ ۶ (قطر ۶ mm) است که مشخصات فنی آنها در جدول ۲ ارائه شده است. در ساخت بتن نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۱ و سنگدانه ریز رودخانه‌ای استفاده شد. بیشینه اندازه سنگدانه‌ها، ۱۲/۵ mm و میزان اسلامپ تقریباً ۹۰ mm بود. مقاومت بتن بر اساس میانگین مقاومت‌های به دست آمده از آزمایش سه نمونه استوانه‌ای استاندارد (۱۵۰ × ۳۰۰ mm) تهیه شده به دست آمد.

۳-۲- پیکربندی تجهیزات بارگذاری

قبل از شروع آزمایشها به منظور مشاهده واضح تر ترک‌ها، سطح خارجی نمونه‌ها با دوغاب آهک سفید اندود شد. پیکربندی تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها دارای تکیه‌گاه ساده غلتکی با آزادی دوران بودند که بارگذاری بر روی وجه فوقانی آنها انجام شد. بار قائم به وسیله تیرهای واسطه از زیر جک هیدرولیکی دریافت و به صورت بار گسترده از طریق صفحات فولادی مستطیلی به ابعاد ۱۳۰ × ۸۰ mm² در طول خالص تیر پخش شد.

۳- ارزیابی نتایج آزمایشها

۳-۱- رفتار کلی

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، در آزمایش نمونه‌های تیر عمیق بار نقطه‌ای جک هیدرولیکی به وسیله عناصر و تیرهای واسطه به صورت بار گسترده در وجه فوقانی تیر عمیق در طول دهانه خالص آن پخش شد. با شروع بارگذاری و رشد تدریجی بار گسترده، اولین بار ترک‌های قائم در نواحی مرکزی تیر مشاهده شدند که با افزایش بار، ضمن بیشتر شدن میزان بازشدگی آنها، ترک‌های قطری دیگری نیز در نواحی نزدیک به تکیه‌گاه پدیدار شدند. این ترک‌ها به مرور به سمت نقاط میانی طول تیر نیز سرایت نمودند. رشد ترک‌های شکل گرفته در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها که ترکیبی از برش و خمش بودند، معمولاً تا حوالی نقاط میانی ارتفاع تیر ادامه داشت و پس از آن متوقف می‌شد. با بیشتر شدن مقدار بار اعمالی علاوه بر ظهور ترک‌های قطری موازی با ترک اصلی، میزان باز شدگی ترک جدید قطری اصلی نیز افزایش می‌یافت. با

شکل ۲- نمای قاب بارگذاری و تجهیزات اضافه شده

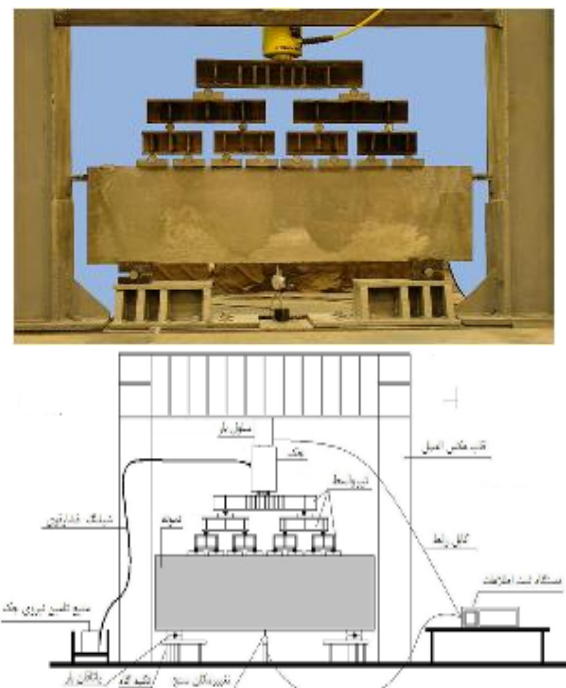


Fig.2. Testing set up

۳-۲-۱- حالت شکست برشی

با کاهش نسبت ظرفیت برشی به ظرفیت خمشی، ظرفیت برشی عضو بتن مسلح قادر به مقابله با تنش‌های برشی بوجود آمده نبوده و در اثر بازشدگی بیش از حد ترک‌های برشی (قطری) تیر عمیق گسیخته خواهد شد. چنین شکستی بسیار ترد بوده و قبل از تسلیم آرماتورهای اصلی بروز می‌نماید لازم به گفتن است، براساس مشاهده تجربی، ترد بودن شکست برشی متأثر از مقاومت بتن بوده و در تیرهای عمیق ساخته شده از بتن با مقاومت بالا، بیشتر شکست برشی به شکل آنی همراه با صدای مهیبی شبیه انفجار بروز می‌نماید. براساس نتایج آزمایش‌های قبلی، نرخ تغییرات نسبی مقاومت نمونه نسبت به مساحت آرماتورهای برشی یک تابع نزولی بوده و با افزایش ρ_D ، دچار کاهش می‌شود. شکل ۴ وضعیت ایده‌آل تغییرات ظرفیت تیر عمیق را نسبت به ρ_D نشان می‌دهد. بر اساس این شکل با افزایش میزان آرماتورهای مؤثر در سطح ترک قطری تیر از اثر تقویت‌کنندگی آنها نیز کاسته می‌شود به گونه‌ای که در $\rho_{D(max)}$ با آغاز شکست خمشی ظرفیت عضو ثابت مانده و افزایش آرماتور برشی تأثیری در رفتار نمونه تحت آزمایش نخواهد داشت بر اساس پژوهشهای Marti [۵]، مقدار $\rho_{D(max)}$ تابع مقاومت فشاری بتن نیز است، $\rho_{D(max)}$ متناظر حالتی از شکست برشی است که در آن بتن عضو فشاری قطری در اثر خردشدگی دچار گسیختگی می‌شود.

شکل ۴- اثر نسبت آرماتورهای برشی در ظرفیت تیر عمیق

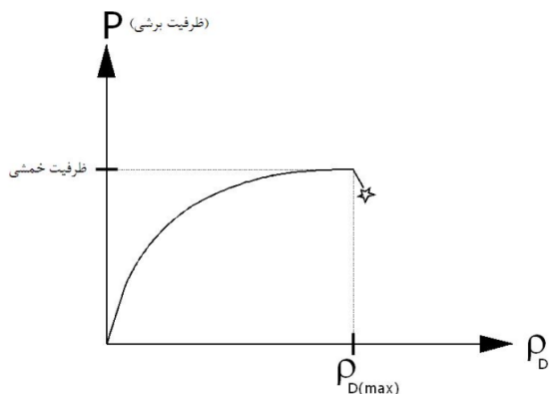


Fig.4. Effect of shear reinforcing on capacity

نزدیک شدن بار به مقدار نهایی خود، ضمن تکثیر تعداد ترک‌های قطری میزان بازشدگی آنها نیز به مرور در حال افزایش بود، به گونه‌ای که به محض رسیدن بار به حد نهایی، نمونه تحت آزمایش در عرض چند ثانیه به شکل ناگهانی دچار شکست ترد برشی شد.

۳-۲- وضعیت شکست نمونه‌ها

گسیختگی کامل نمونه‌های سری E به صورت شکست برشی بود که وضعیت آن در شکل ۳ ارائه شده است.

شکل ۳- وضعیت شکست نمونه‌های آزمایش شده



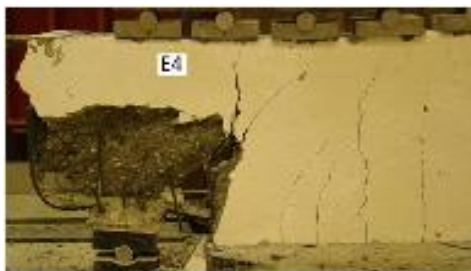
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig.3. The various failure of specimens

۳-۴- نمودار بار- تغییر مکان

در شکل ۶، نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های سری E نشان داده شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد قبل از آغاز ترک خوردگی خمشی به دلیل رفتار ارتجاعی تیر عمیق مقدار سختی خمشی در همه نمونه‌ها مستقل از مساحت آرماتورهای برشی بوده و مقدار یکسانی دارد. ولی پس از آغاز ترک خوردگی‌های خمشی قائم و برشی قطری، آرماتورهای برشی تا حدودی در جبران کاهش سختی ناشی از انواع ترک خوردگی مؤثر بوده به گونه‌ای که براساس نمودارهای یاد شده افت سختی در نمونه‌های کم آرماتور بیشتر از نمونه‌های پرآرماتور است.

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی مربوط به بار نهایی و ترک خوردگی نمونه‌ها

| نمونه ها | P_{cr} (بار متناظر با ترک خوردگی قطری) (kN) | P_u (بار نهایی) (kN) | $\frac{P_{cr}}{P_u}$ | $\rho_v(\%)$ |
|----------|---|------------------------|----------------------|--------------|
| E-۱ | ۳۹۲ | ۵۹۴ | ۰/۶۶ | ۰ |
| E-۲ | ۴۱۱ | ۶۳۱ | ۰/۶۵ | ۰/۱۱۸ |
| E-۳ | ۴۳۳ | ۶۷۶ | ۰/۶۴ | ۰/۲۹ |
| E-۴ | ۴۸۵ | ۸۰۷ | ۰/۶۰ | ۰/۴۷ |
| E-۵ | ۴۰۹ | ۹۵۰ | ۰/۵۶ | ۰/۶۲ |

Table.3. Results of experimental for ultimate and cracking load of specimens

۳-۳- اثر مساحت آرماتورهای برشی در ظرفیت برشی نمونه‌ها در هر کدام از نمونه‌های سری E با وجود یکسان بودن آرایش کلی آرماتورهای برشی، مساحت آنها متفاوت بود. مساحت آرماتور برشی یا به عبارت دقیق‌تر مساحت آرماتور برشی معادل اثر مستقیم بر ظرفیت برشی نمونه‌ها داشت. در شکل ۵ تغییرات مقاومت برشی تیرها در مقابل افزایش مساحت آرماتورهای برشی نمایش داده شده است.

شکل ۵- تغییرات ظرفیت برشی نمونه‌های آزمایشگاهی در اثر افزایش درصد آرماتور برش

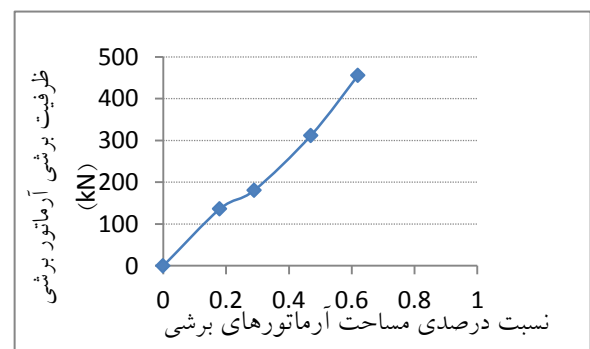


Fig.5. variation of shear capacity versus increasing of shear reinforcing

همان‌گونه که از نمودار پیداست، با افزایش درصد مساحت آرماتورهای برشی، ظرفیت نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد ولی نرخ افزایش نسبی مقاومت در قبال افزایش مساحت یا درصد آرماتورهای برشی روند نزولی داشته؛ به گونه‌ای که تأثیر فزاینده این آرماتورها روی مقاومت در نمونه‌های کم آرماتور E-۲ در مقایسه با نمونه پرآرماتور E-۴ بیشتر است.

شکل ۶- تغییرات نیرو- جابجایی قائم وسط تیر در نمونه‌های سری E

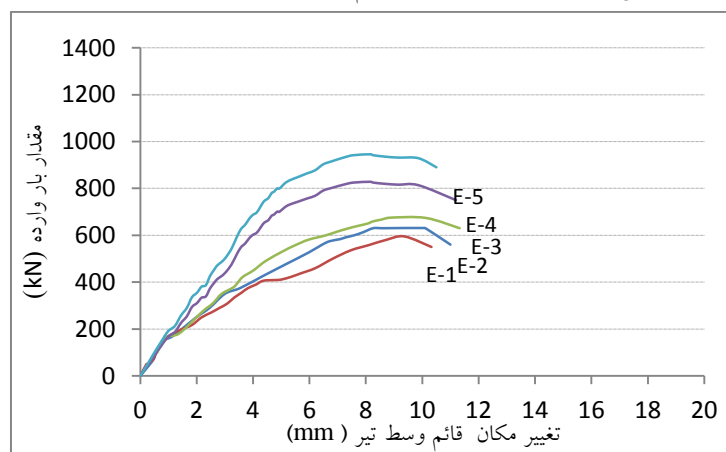


Fig.6. variation of load-deflection of mid-span

۴-تحلیل نمونه‌ها با استفاده از روش خرابایی

۴-۱- تعریف روش خرابایی

مدلسازی خرابایی یکی از روش‌های طراحی سازه‌های بتن مسلح معمولی و پیش‌تنیده است که ظرفیت سازه پیچیده جایگزین شده با مدل خرابایی، به راحتی با تحلیل استاتیکی مدل خرابایی جایگزین قابل محاسبه خواهد بود.

مدل خرابایی در تحلیل و طراحی سازه‌هایی که پس از بارگذاری دچار تغییر شکل‌های خارج از صفحه نمی‌شود کاربرد بسیار خوبی دارد، که از نمونه این سازه‌ها می‌توان به تیرهای عمیق و کربل‌ها اشاره نمود. این قبیل اعضای بتن مسلح بیشتر دچار تغییر شکل‌های برشی شده و خمش سهم ناچیزی در رفتار کلی آنها دارد. در مدل خرابایی کلیه روابط بر مبنای شرایط تسلیم و با توجه به نتایج تجربی به دست آمده از رفتار واقعی اعضای مدل خرابایی (اعضای فشاری، کششی و گره‌ها) تنظیم می‌شوند. به عبارت بهتر، این روش به دلیل پیروی از شرایط حد پایین نظریه پلاستیک که بر مبنای شرایط تسلیم و تعادل است، نتایج محافظه‌کارانه‌ای ارائه خواهد داد، به گونه‌ای که ظرفیت به دست آمده از آن، کوچکتر یا مساوی مقاومت واقعی عضو بتن مسلح خواهد بود.

۴-۲- وضعیت مدل خرابایی جایگزین در نمونه‌های آزمایشگاهی

با توجه به وضعیت بارگذاری و چگونگی شکست برشی نمونه‌ها دو حالت برای مدل خرابایی این نمونه‌ها می‌توان فرض نمود که در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۸-الف اعضای فشاری اصلی مدل به صورت بادبزی دارای مقطع متغیر است که این نوع عضو فشاری فاقد اجزای کششی فرعی بوده و اثر کاهنده نرم‌شدگی فشاری بتن در نیروی مقاوم آن نیز ناچیز است. بنابراین بیشتر بودن مقدار ظرفیت برشی در حالت بارگذاری گسترده ناشی از افزایش نیروی مقاوم اعضای فشاری اصلی مدل خرابایی است.

در شکل ۸-ب مدل خرابایی جایگزین تیر عمیق شکل پیچیده‌تری نسبت به حالت قبل دارد. با توجه به مطالعات Schlaich و Schafer [۳]، به منظور برقراری شرایط سازگاری در خرابایی نامعین مفروض، بهتر است زاویه بین

همچنین شکست همه نمونه‌ها به صورت برشی بوده و نمودار نیرو-جابجایی بدون بروز تغییر مکان‌های بزرگ دچار افت ناگهانی شده است. یعنی با وجود استفاده از آرماتور برشی در تیرهای نمونه، به دلیل بالا بودن مقاومت فشاری بالای بتن و تردشکنی آن، آرماتورهای مزبور قادر به افزایش ظرفیت تیر تاحد ظرفیت خمشی نبوده و شکست برشی که وضعیت تردگونه‌ای دارد، بر شکست خمشی مقدم بوده است.

۳-۵- اثر نوع بارگذاری در ظرفیت برشی نمونه‌ها

در شکل ۷ ظرفیت نهایی نمونه‌های تحت آزمایش با نمونه‌های مشابه تحت بارگذاری متمرکز-مقارن دو نقطه‌ای (مستخرج از مرجع [۱۵]) مقایسه شده است. از آنجا که شکست همه نمونه‌های مورد مقایسه (تحت بارگذاری گسترده و متمرکز) به صورت برشی و مستقل از مقاومت خمشی بوده برای مقایسه ظرفیت نهایی نمونه‌ها از شاخص تنش برشی بیشینه یا نیروی برشی ایجاد شده در تکیه‌گاه‌ها استفاده می‌شود. همان‌گونه که پیداست، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بار متمرکز با داشتن ظرفیت نهایی در حد ۰/۵۳ برابر نمونه‌های مشابه تحت بار گسترده، در مقایسه با آنها شکست تردتری را نیز تجربه نمودند [۱۵]. علت اصلی چنین پدیده‌ای را می‌توان ناشی از اختلاف در نوع شکل گیری میدان‌های فشاری بتن در نمونه‌های تیر عمیق مقایسه شده دانست که در بخش آتی به آن پرداخته خواهد شد. (نمونه‌های A از لحاظ هندسی مشابه نمونه‌های E است، ولی تحت بار متمرکز است.

شکل ۷- مقایسه ظرفیت نهایی نمونه‌های تحت بارگذاری گسترده و متمرکز دو نقطه‌ای مقارن

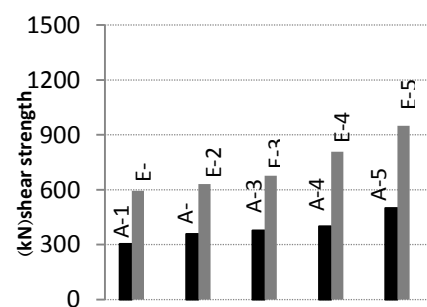


Fig.7. Comparison between result of point and distributed loading

تیرهای عمیق تحت بار گسترده از نوع بادبزی است. در اعضای فشاری بادبزی نیروی کششی عرضی ایجاد نمی‌شود، از این رو در محاسبه نیروی مقاوم عضو فشاری نیازی به لحاظ نمودن اثر نرم شدگی فشاری بتن نیست. شکل ۹ جزئیات محاسبه نیروی مقاوم عضو فشاری بادبزی را نشان می‌دهد. با توجه به مشاهده آزمایشگاهی در همه نمونه‌های سری E آرما توره‌های برشی تسلیم شده بودند، بنابراین در روابط تعادل مدل خرابایی برش انتقال یافته به وسیله آرما توره‌های برشی برابر نیروی تسلیم آنها است. یعنی:

$$V_c = F \sin \theta \quad (1)$$

$$F = \int_0^{54} r b f_c' \sin \theta d \theta \quad (2)$$

$$V_u = V_c + V_s \quad (3)$$

$$V_s = A_v f_y \quad (4)$$

که V_c برش انتقال یافته به وسیله بتن، V_s برش انتقال یافته به وسیله آرما توره‌ها، V_u برش نهائی تکیه‌گاه، A_v مساحت آرما توره‌های برشی قائم، f_y تنش تسلیم آرما توره‌های قائم، F نیروی مقاوم عضو فشاری بادبزی، f_c' مقاومت فشاری بتن و b عرض مقطع تیر است. برای بررسی دقت و کارائی مدل تعمیم یافته فوق، از آن برای تعیین ظرفیت برشی نمونه‌های سری E و نمونه‌های آزمایش شده به وسیله صحرائی - عربزاده [۱۶] استفاده شد که خلاصه نتایج آن در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش گفته شده در هر دو گروه از نمونه‌های آزمایشگاهی دقت خوبی داشته است.

شکل ۹- تعادل مدل خرابایی با اعضای فشاری بادبزی

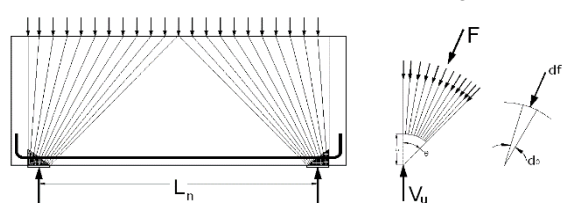


Fig.9. statically equilibrium of fan shape strut

اعضای فشاری مایل و اعضای کششی اصلی (θ) بزرگتر از ۴۵ درجه (ترجیحاً ۶۰ درجه) فرض شود که با داشتن مقدار θ هندسه مدل مزبور نیز معین خواهد بود [۳]. در این مدل عضو فشاری که در حالت الف به صورت یکپارچه فرض شده بود، به صورت ترکیبی از دو عضو فشاری مورب و قائم در نظر گرفته شده که برای برقراری تعادل استاتیکی در محل تلاقی آنها، یک عضو افقی جدید نیز به سیستم اضافه شده است. با وجود اینکه مدل (الف) ساده شده حالت (ب) است، ولی نظر به وضعیت ترک خوردگی اولیه و شکست نهایی نمونه‌ها استفاده از مدل (ب) به عنوان مدل خرابایی جایگزین مناسب‌تر خواهد بود.

شکل ۸- الف- عضو فشاری بادبزی [۷]

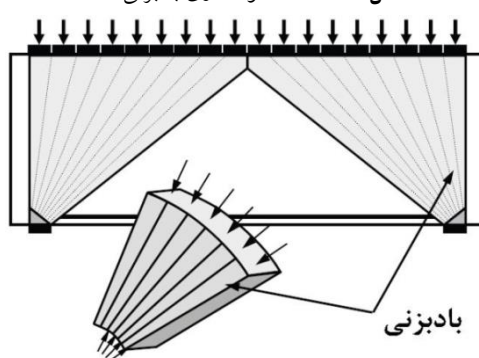


Fig.8(a). fan shape strut

شکل ۸- ب- عضو فشاری بادبزی مرکب [۳]

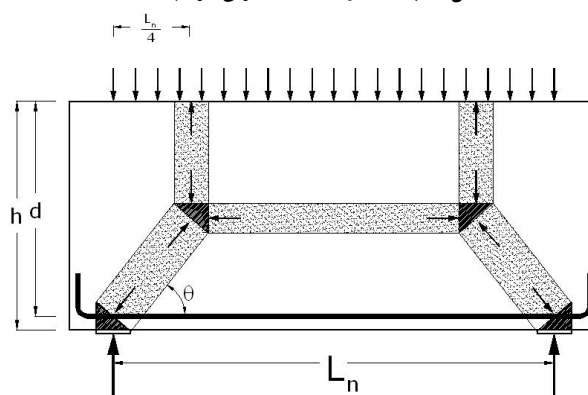


Fig.8(b). combined fan shape strut

۳-۴- تحلیل نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل خرابایی بادبزی

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، اعضای فشاری موجود در

میدان فشاری بتن، ظرفیت آنها حدوداً ۲ برابر موارد مشابه تحت بار متمرکز است.

➤ توزیع کرنش آرماتورهای برشی در تیرهای عمیق تحت بار گسترده، در مقایسه با موارد مشابه تحت بار متمرکز وضعیت یکنواخت تری دارند؛ به گونه‌ای که از لحظه آغاز بارگذاری همه آرماتورهای برشی قائم تحت کرنش کششی نسبتاً یکنواختی واقع می‌شوند.

➤ سختی نمونه‌های تیر عمیق قبل از شروع ترک خوردگی مستقل از میزان آرماتورهای برشی است. ولی پس از آغاز ترک خوردگی نمونه‌هایی که با درصد بالاتری از آرماتورهای برشی مسلح شده‌اند، به دلیل سازوکار بازدارندگی این آرماتور در بازشدگی بیش از حد ترک های برشی، میزان کاهش سختی بتن در مقایسه با نمونه‌های کم آرماتور، کمتر است.

➤ اثر آرماتورهای قائم در افزایش ظرفیت برشی تیرهای عمیق تحت بار گسترده در مقایسه با موارد مشابه تحت بار متمرکز مشهودتر است.

➤ مدل خریایی بادبزی برای ساده‌سازی تیرهای عمیق تحت بار گسترده قابل استفاده بوده و با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته در این مقاله از دقت قابل قبولی برخوردار است. ولی با وجود این تعمیم و توسعه آن نیاز به بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی بیشتری دارد.

References

۶- مراجع

1. Foster, S. J, and Gilbert, R. I., 1998, Experimental Studies on High-Strength Concrete Deep Beams, *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 4, pp.382-390.
2. Siao, W.B., 1993, Strut-and-Tie Model for Shear Behavior in Deep Beams and Pile Caps Failing in Diagonal Splitting, *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 4, pp. 356-363.
3. Michael D. Brown, Cameron L. Sankovich, Oguzhan Bayrak, and James O. Jisra, Behavior and efficiency of bottle-shaped struts, *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, Vol.103, No.3, 2006. pp. 348-355.
4. Schlaich, J., and Schäfer, K., 1991, Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models, *The Structural Engineer*, Vol. 69, No. 6, pp. 113-120.
5. Marti, P., 1999, How to Treat Shear in Structural Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 408-415.

جدول ۴- نتایج تحلیل نمونه های سری E

| نمونه | P_{exp} (بار نهایی آزمایشگاهی -kN) | P_u (بار نهایی تحلیلی -kN) | $\frac{P_u}{P_{exp}}$ |
|-------|--|------------------------------------|-----------------------|
| E-۱ | ۵۹۴ | ۵۶۴ | ۰/۹۴ |
| E-۲ | ۶۳۱ | ۶۲۱ | ۰/۹۸ |
| E-۳ | ۶۷۶ | ۶۷۶ | ۱/۰۰ |
| E-۴ | ۸۰۷ | ۷۸۱ | ۰/۹۷ |
| E-۵ | ۹۵۰ | ۸۸۳ | ۰/۹۳ |

Table.4. Results of analysis for series E

جدول ۵- نتایج تحلیل نمونه‌ها عربزاده-صحرانی [۱۶]

| نمونه | P_{exp} (بار نهایی آزمایشگاهی -kN) | P_u (بار نهایی تحلیلی -kN) | $\frac{P_u}{P_{exp}}$ |
|-------|--|------------------------------------|-----------------------|
| B-۱ | ۲۴۰ | ۲۲۲ | ۰/۹۲ |
| B-۲ | ۱۷۰ | ۲۲۲ | ۱/۳۰ |
| B-۳ | ۱۶۵ | ۱۵۸ | ۰/۹۶ |
| B-۴ | ۱۶۰ | ۱۵۸ | ۰/۹۹ |
| B-۵ | ۲۲۰ | ۲۳۵ | ۱/۰۶ |

Table.5. Result of analysis for the specimens of Ref.16

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش گفته شده در هر دو گروه از نمونه‌های آزمایشگاهی دقت خوبی داشته است. البته نظریه کم بودن تعداد نمونه‌های بررسی شده، ارزیابی بهتر مدل خریایی بادبزی نیاز به نمونه‌های بیشتر با تنوع در مقاومت فشاری بتن و آرماتورهای برشی دارد

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله رفتار آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح تحت بار گسترده بررسی شده، و ظرفیت آنها با استفاده از مدل خریایی بادبزی محاسبه شد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمد:

➤ تیرهای عمیق بتن مسلح تحت بار گسترده رفتار متفاوتی نسبت به حالتی که تحت بار متمرکز قرار می‌گیرند، از خودشان نشان دادند؛ به گونه‌ای که به دلیل کاهش اثر نرم‌شدگی فشاری بتن و میزان کشش عرضی ایجاد شده در

12. A. Arabzadeh, A. R. Rahaei, R. Aghayari, 2009, A simple strut-and-tie model for prediction of ultimate shear strength of RC deep beams, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 141-154
13. CSA Standard CAN3-A23.3-94, 1994, Design of Concrete Structures for Buildings with Explanatory Notes, *Canadian Standards Association*, Rexdale, Ontario.
14. ACI 318-02, 2002, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
15. A. Arabzadeh, R. Aghayari, A. R. Rahaei, 2011, Investigation of experimental and analytical shear strength of reinforced concrete deep beams, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 207-214.
۱۶. یوسف صحرائی، بررسی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سر ساده تحت اثر بار گسترده یکنواخت. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی دکتر ابوالفضل عربزاده، ۱۳۷۷.
6. Collins, M.P., and Mitchell, D., 1986, A Rational Approach to Shear Design – The 1984 Canadian Code Provisions, *ACI Journal*, Vol. 83, No. 6, pp 925-933.
7. Ramirez, J.A., and Breen, J.E., 1991, Evaluation of Modified Truss-Model Approach for Beams in Shear, *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, pp. 562-571.
8. Tan, K., Kong, F., Teng, S., and Weng, L., 1997, Effect of Web Reinforcement on High-Strength Concrete Deep Beams, *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 5, pp. 572-582.
9. Kong, F. K., Robins, P. J., and Cole, D. F., 1970, Web Reinforcement Effects on Deep Beams, *ACI Journal*, V. 67, No. 12, pp. 1010-1016.
10. Oh, J. K., and Shin, S. W., 2001, Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Deep Beams, *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 2, pp. 164-173.
11. A. Arabzadeh, 2001, Analysis of some experimental results of simply supported deep beams using truss analogy method, *Iranian Journal of Science & Technology*, Vol. 25, No. 1, Shiraz University, IRAN, 2001, pp. 115-128.

ANALYSIS OF DEEP BEAMS WITH CONCRETE OF HIGH-STRENGTH UNDER DISTRIBUTED LOADING

R. Aghayari¹, A. Arabzadeh², k.zanganehzadeh³

1. Assistant Professor of Civil Engineering Dept, Razi University, Kermanshah

2. Assistant Professor of Structural Engineering Dept., Tarbiat Modarres University, Tehran

3. Student M.Sc. of Civil Engineering Dept, Razi University, Kermanshah

reza_agh@razi.ac.ir

Abstract:

Reinforced concrete deep beams have useful applications in many structures, such as tall buildings, foundations, offshore structures, and several others. They as important structural elements having small span-to-depth ratio. The investigation of their behavior is a subject of considerable interest in RC structures researches and some studies on the shear strength of reinforced concrete deep beams have been carried out over the last fifty years. In deep beams, according to shear span-to-depth ratio and web reinforcement the ultimate strength is generally controlled by shear rather than flexure, if the sufficient amount of longitudinal reinforcement is used. Several different failure modes have been identified from experimental studies, due to variability in failure, the determination of their shear strength and identification of failure mechanism are very complicated. In this paper the influence of effective parameters on the behavior of high-strength RC deep beams was investigated. For this purpose, an experimental-analytical investigation was conducted; a total of five reinforced concrete deep beams with compressive strength in range of 60 MPa were tested under uniform distributed top loading. The tested specimens were simply supported and reinforced by vertical steel bars in various spacing. The general behavior of tested beams was investigated. Observations were made on mid-span vertical deflections, cracks form, failure modes and shear strengths. All the beam specimens showed a same response up to failure. The test results indicated that vertical web reinforcement are efficient in shear capacity of deep beams, almost specimens were failed in shear. According to the test results, the shear capacity is affected by amount of web reinforcement and the test specimens are stronger in comparison with those were tested under two-point loading. Elastic solutions of reinforced concrete deep beams provide a good description of the behavior before cracking, but after cracking, a major redistribution of stresses occurs and hence the beam capacity must be predicted by inelastic analysis. Due to their geometric proportions, the capacity of reinforced concrete deep beams is governed mainly by shear strength. Strut-and-tie method is one of the most simple and applicable methods which can be used to simplify analysis and design of deep beams. Strut-and-tie modeling is the most rational and simple method for designing no flexural members currently available. At least, the experimental strength of specimens was compared with predicted results of strut-and-tie method (STM). The results indicates the proposed STM provide acceptable shear capacity of deep beam under uniform loading.

Keywords: deep beam; strut-and-tie; shear strength; shear reinforcement; distributed top loading