

# بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی عملکرد اعضای خمشی بتن مسلح بهسازی شده با تحت فشار قرار دادن منطقه برش بحرانی

علیرضا خالو

استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف

محمد شمسایی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه - دانشگاه صنعتی شریف

علیرضا امینی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله - دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت ۷۸/۷/۴، تاریخ تصویب ۷۹/۲/۳)

## چکیده

در این مقاله، تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با محصور شدگی منطقه برش بحرانی بصورت آزمایشگاهی و تئوریک مورد بررسی قرار گرفته است. محصوریت بوسیله اعمال نیروی پس فشردگی قائم در منطقه برش بحرانی با بکارگیری نبشی، بولت و صفحه انجام گرفته و آزمایش و بارگذاری تیرها شامل حالات (۱) بارگذاری تیر تا ایجاد ترک برشی اصلی، سپس تقویت تیر و ادامه بارگذاری تا شکست کامل، (۲) تقویت تیر از ابتدا و بارگذاری تا شکست کامل، و (۳) بارگذاری تیر تقویت نشده تا شکست کامل، می‌شود. تأثیر پارامترهای متفاوتی شامل مقاومت بتن، طول دهانه برش، مقدار آرماتور طولی کششی، مقدار نیروی پس فشردگی، حالت تقویت و استفاده از صفحه سراسری در تقویت منطقه برش، با آزمایش ۲۴ تیر بررسی شده است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهند که در حضور نیروی پس فشردگی نسبتاً پایین ( $0.4f'c$ ) ناشی از تقویت، مقاومت برشی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و مود شکست تیرها از برشی به خمشی تغییر یافته و شکستی نرم فراهم می‌آید. همچنین با این مقدار پس فشردگی ضمن تضمین شکست خمشی نرم، تأثیر دیگر پارامترها روی مقاومت و نرمی تیرها محدود است. محاسبات انجام شده براساس تئوری موهر نیز نشان می‌دهد که این روش تقویت برش در تیرها، بسیار مؤثر است و شکست شکل‌پذیر خمشی در تیرهای فاقد خاموت را ایجاد می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تیرهای بتنی مسلح، تقویت برشی، محصورشدگی (پس فشردگی)، آزمایش، تئوری

## مقدمه

بدلائل مختلف از جمله عدم اجرای صحیح بتن، عدم بکارگیری آرماتورهای برشی و خمشی بطور مناسب، تغییر نحوه استفاده از سازه، احتمال شکست نامطلوب در اعضای سازه همانند تیرها، ستونها، اتصالات و .... غیره می‌تواند وجود داشته باشد. هر یک از این اعضا باید مقاوم در برابر بارها و نیروهای مختلف بوده و قابلیت ارائه رفتار نرم را از خود داشته باشند.

تیرهای بتنی مسلح باید بنحوی طراحی شوند تا بتوانند مقاومت خمشی را بطور کامل دارا بوده و شکست خمشی نرم را فراهم آورند. شکست برشی بصورت شکست کشش قطری در اعضای بتن مسلح، از نوع شکست ترد بحساب می‌آید. بنابراین، یک تیر بتن مسلح باید دارای مقاومت برشی کافی بوده تا اطمینان

از شکست نرم خمشی حاصل شود.

آقایان Collins و Roper [۱] در یک برنامه تحقیقاتی روی روشهای مختلف تقویت و بهسازی برشی تیرهای بتنی، ۲۰ تیر فاقد خاموت در منطقه برش بحرانی را مورد آزمایش قرار دادند. روشهای تقویت شامل پس کشیدگی قائم بخیه‌های فلزی، تزریق اپوکسی و همچنین چسباندن خاموتهای فولادی برشی تقوینی به جان توسط چسبهای اپوکسی، می‌شود. متوسط افزایش مقاومت حاصله ناشی از روشهای مختلف به ترتیب ۱۰۰ درصد، ۳۰ درصد، ۴۸ درصد و ۶۷ درصد بوده است. در کلیه روشهای تقویت مقاومت و شکل‌پذیری نسبت به تیرهای مبنا بیشتر بوده است. لیکن بطور کلی در روشهای بخیه زدن، تزریق اپوکسی و خاموتهای - تقویتی،

## برنامه آزمایشها

روش تقویت برشی تیرها، بوسیله اعمال تنش پس کشیدگی در منطقه برش بحرانی انجام می شود، که اساس آن بر عملکرد محصورشدگی جهت بالا بردن مقاومت و نرمی بتن استوار است.

### پارامترهای مورد مطالعه و دلیل انتخاب آنها

پارامترهای مورد بررسی شامل مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$ )، و نسبت دهانه برش به عمق مؤثر مقطع ( $\frac{a}{d}$ )، مقدار فولاد کششی طولی ( $\rho$ )، مقدار تنش پیش تنیدگی بصورت درصدی از مقاومت بتن (%P.T.)، حالت تقویت شامل تقویت تیر از ابتدا یا تقویت تیر پس از ایجاد ترک برشی و همچنین استفاده از صفحه سراسری در منطقه برش بحرانی می باشند. مقدار  $f'_c$  در حدود  $350 \text{ Kg/cm}^2$  برای بتن های با مقاومت معمولی و مقدار  $f'_c = 500 \text{ Kg/cm}^2$  نیز برای تیرهای با بتن با مقاومت بالا انتخاب گردید. پارامتر دیگری که مؤثر بر عملکرد برش است مقدار دهانه برش ( $\frac{a}{d}$ ) (فاصله بار تا تکیه گاه به مقدار عمق مؤثر مقطع) می باشد. برای نزدیک شدن رفتار تیر به حالت برش مقدار ( $a$ )، مساوی  $\frac{L}{4}$  و  $\frac{L}{6}$  در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مقدار عمق مؤثر ( $d$ )، در تیرهای آزمایشی ۱۳ سانتیمتر می باشد مقدار  $\frac{a}{d}$  برای حالت  $a = \frac{L}{4}$  برابر با  $\frac{3}{17}$  و برای حالت  $a = \frac{L}{6}$  برابر با  $\frac{2}{12}$  است که بین دامنه معمول جهت شکست برشی که در حدود ۲ تا  $\frac{3}{5}$  می باشد، قرار دارد. طراحی آرماتورهای طولی براساس ضوابط آئین نامه ACI (۱۲) برای مناطق لرزه خیز انجام گرفت. بدین منظور طراحی تیرها بصورت کم آرمه و با توجه به ملزومات شکل پذیری بوده و مقدار  $\rho$  بیش از حداقل مقدار لازم ( $\rho_{\min} = \frac{14}{fy}$  و  $\rho_{\min} = f'_c fy 0.792 \sqrt{V}$ ) و کمتر از مقدار ( $\rho_{\max} = 0.5\rho_b + \rho'$ ) نیز محدود شده است. در این مطالعه مقاطع با بتن معمولی برای دو مقدار  $\rho$  و  $1.5\rho$  و مقاطع با بتن مقاومت بالا برای یک مقدار  $\rho$  طراحی شده اند.

پارامتر دیگر مؤثر بر مقدار افزایش مقاومت برشی می تواند مقدار پس کشیدگی در طول برش بحرانی باشد. دو مقدار برای درصد پس کشیدگی (%P.T.) شامل  $0.04 f'_c$  و مقدار  $0.075 f'_c$  منظور شده است. کلیه تیرها با طول ۱۸۰ سانتیمتر و اعمال بار بصورتی که مقدار  $\frac{a}{d}$  کمتر از  $\frac{3}{5}$  باشد و جهت ایجاد شکست بصورت برشی انتخاب گردید. از طرفی دیگر سایر مطالعات و آزمایشاتی که قبلاً انجام گرفته بود (۴-۱) نیز بر روی تیرهایی با طول ۱۰۰ الی ۱۸۰ سانتیمتر انجام شده بود. مقدار ارتفاع تیر ۱۵ سانتیمتر و عرض آن ۸ سانتیمتر در نظر گرفته شد تا ابعاد تیر تقریباً متناسب با ابعاد واقعی باشد.

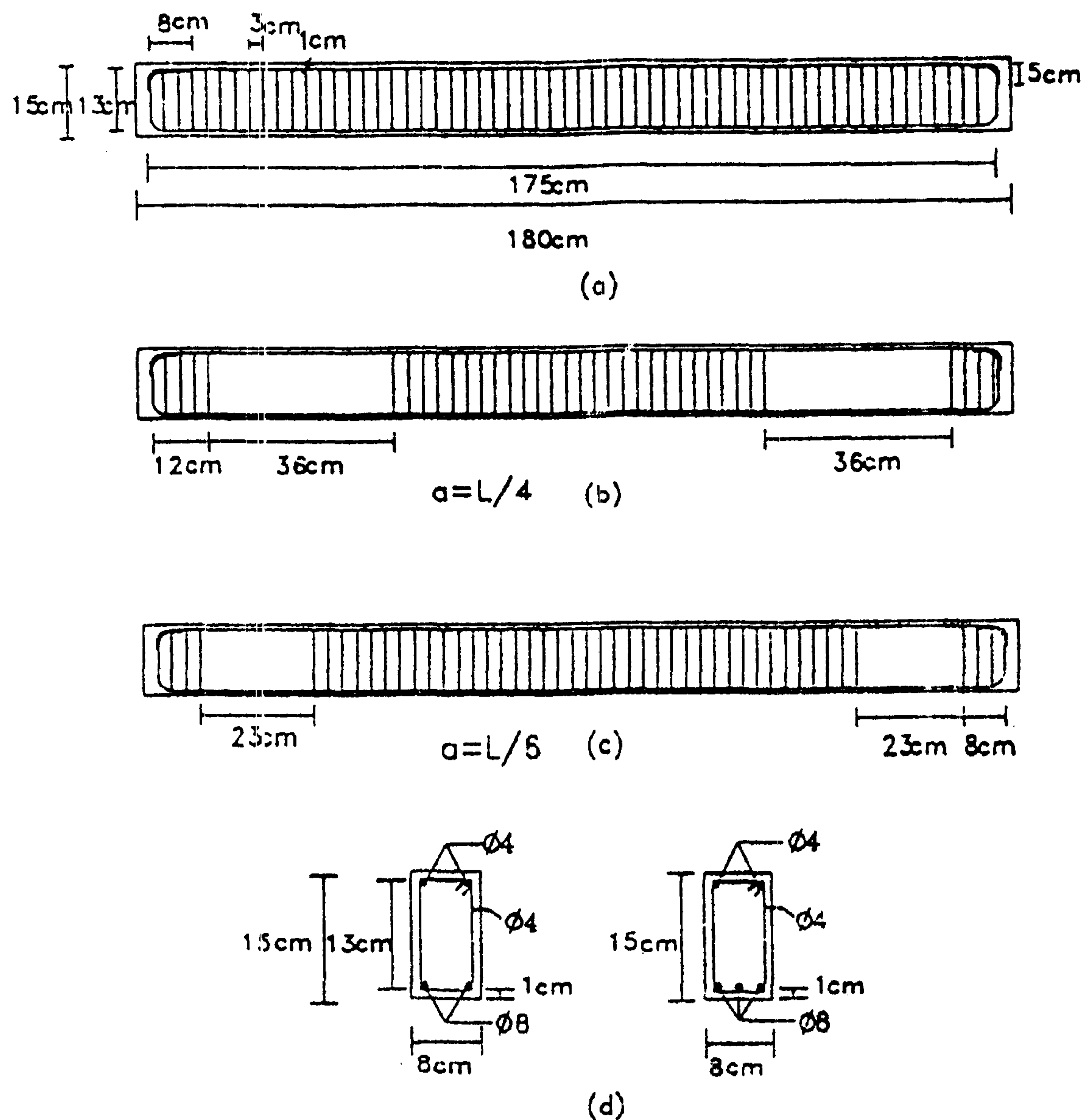
شکست بصورت برشی و ترد حاکم بوده است. نتایج روش پس کشیدگی با تعداد آزمایش های محدود، مودشکست خمشی و نرم را ارائه داده اند.

آقای Al-Sulaimani و همکاران [۲] تحقیقاتی در زمینه تیرهای تقویت شده در برابر برش با استفاده از ورقهای فایبر گلاس چسبانده شده انجام دادند. تقویت این تیرها پس از مشاهده اولین ترک برشی بصورت چسباندن ورقهای بصورت نوارهای مجزای متوالی، ورق در دو طرف جان و دورپیچ U شکل توسط چسب اپوکسی انجام گرفت. نتیجه عملی این بود که ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده در مقایسه با تیرهای مرجع حدود ۲۵ تا ۶۰ درصد افزایش یافته و لیکن شکست بصورت برشی بوده است.

آقای Chajes و همکاران [۳] نیز آزمایشهایی بر روی ۱۲ تیر با مقطع T شکل انجام دادند. تقویت تیرها توسط چسباندن پارچه های آرامید، فایبر گلاس و گرافیت با زوایای بافت مختلف، با استفاده از اپوکسی به جان تیرها انجام گرفت. در نتیجه این تقویتها میزان افزایش مقاومت نهایی تیرها بطور متوسط ۹۷ درصد بوده و مود شکست همه آنها از نوع ترد برشی بوده است. نکته قابل توجه عدم جداسازی پارچه ها از سطح بتن می باشد. فرمولبندی نیز بر اساس مقاومتهای تئوریک پارچه کامپوزیت و بتن تیر جهت پیش بینی مقاومت کلی تیر ارائه گردیده است.

همچنین آقای Triantafillou [۴]، یازده تیر T شکل تقویت شده با ورقهای پلیمری مسلح به الیاف کربن، با نسبتهای سطح و جهت الیاف مختلف تحت آزمایش قرار داد. نتایج آزمایشها افزایش در نمونه های تیر تقویت شده نسبت به نمونه های مینا از ۶۵ تا ۹۵ درصد را نشان می دهند. او نیز مدلی تحلیلی جامع برای طراحی اینگونه اعضا با استفاده از نتایج آزمایشهای خود و دیگران براساس حالتیهای حدی نهایی ارائه داده است.

ترمیم و تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از چسباندن ورقهای کامپوزیت (گلاس فایبر، آرامید و فایبر گلاس، گرافیت و الیاف کربن) و بخیه زدن، تزریق اپوکسی و چسباندن خاموتهای فولادی برشی، مقاومت برشی تیرها را افزایش داده و در موارد محدودی امکان تسلیم شدن فولاد کششی خمشی را فراهم می آورد. لیکن بطور کلی امکان ایجاد مود شکست خمشی نرم با این روشها براساس اطلاعات موجود وجود ندارد. برای اجرای روشی جهت تعمیر و تقویت برشی تیرهای بتنی، توجه روی افزایش مقاومت برشی بتن تحت اثر پدیده محصورشدگی گردید. بدین صورت که ناحیه آسیب دیده و یا مورد تقویت برشی به میزان درصدی از مقاومت بتن در جهت بارگذاری پس کشیده می شود.



شکل ۱: جزئیات تیرهای بتن مسلح.

### مصالح و ساخت نمونه‌های آزمایش

بر اساس آزمایش تنش تسلیم برای آرماتور کششی ( $\phi 8$ ) برابر  $4200 \text{ kg/cm}^2$ ، و برای آرماتور فشاری و خاموت ( $\phi 4$ ) برابر  $2400 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. خاموتها در فواصل ۳cm از یکدیگر قرار داده شدند. شکل (۱) جزئیات تیرها و آرایش قفسه‌های آرماتور را نشان می‌دهد. شکل ۱d تیرهای با بتن مقاومت معمولی را نشان می‌دهد. در تیرهای با بتن معمولی، با  $\rho$  پایین از  $2\phi 8$  و با  $\rho$  بیشتر ( $1/5$  برابر قبلی) از  $3\phi 8$  در کشش استفاده بعمل آمد. در تیرهای با بتن مقاومت بالا، از  $3\phi 8$  در کشش استفاده شد. در کلیه تیرها از  $2\phi 4$  بعنوان آرماتور فشاری استفاده بعمل آمد. در شکل ۱a، تیر مینا، دارای خاموتهای برشی بوده و جهت کنترل شکست برشی و ارائه شکست خمشی نرم ساخته شده، در شکل ۱b، تیر فاقد خاموت در منطقه برش بحرانی ( $a=L/4$ ) و در شکل ۱c، نیز تیر فاقد خاموت در منطقه برش بحرانی ( $a=L/6$ ) به‌مراه جزئیات مربوطه نشان داده شده است. در طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا از روانساز اعلا و دوده سیلیسی نیز استفاده شده است. هر دو طرح اختلاط برای اسلامپ بین ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر طراحی شدند. میانگین مقاومت فشاری بتن تیرهای با بتن معمولی  $34/5 \text{ MPa}$  و

مقاومت تیرهای با بتن مقاومت بالا  $51 \text{ MPa}$  نتیجه شده است. برای تقویت تیرها و اعمال نیروی پس‌فشرده‌گی از نبشی شماره ۱۰ ( $1 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ ) استفاده بعمل آمد. همچنین از بولتهایی با قطر  $16 \text{ mm}$  و طول  $25 \text{ cm}$ ، و با مقاومت بالا (CK ۴۵) استفاده بعمل آمد. با آزمایش کشش روی بولتها،  $E$  و  $f_y$  فولاد بترتیب برابر با  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  و  $4850 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. در زیر نبشی‌های بالا و پایین در هر دهانه برش، از صفحه سراسری با ابعاد  $40 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  برای تیرهای با  $a=L/4$  و از صفحه سراسری با ابعاد  $28 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  برای تیرهای با  $a=L/6$  استفاده بعمل آمد. ضخامت ورق سراسری با توجه به هماهنگی مورد نیاز آن با تغییر شکلهای تیر بویژه در مراحل نهایی بارگذاری در منطقه پلاستیک، به  $4 \text{ mm}$  محدود گشت.

### نحوه تقویت و بهسازی تیرهای بتن مسلح

تقویت منطقه برش تیرهای بتن مسلح با تحت فشار قرار دادن نمونه‌ها در منطقه برش بحرانی انجام گرفت. برای اعمال تنش قائم در منطقه برش از صفحه و بولت برای اعمال فشار استفاده شد [۶ و ۷]. در زیر صفحه سراسری از لاستیک برای پخش یکنواخت

گردد. پس از اعمال بار مهره بولتها تا حد امکان سفت شده و سپس باربرداری شده است. جدول مشخصات تیرها بر حسب پارامترهای مختلف هر تیر در جدول (۱) نشان داده شده است.

تنش و جلوگیری از خرد شدگی موضعی احتمالی بتن استفاده شد. برای اعمال فشار در منطقه برش بحرانی تیرها از دستگاه پرس استفاده شد. بار وارد بر نبشی‌ها حدود ۱۵٪ بیشتر از مقدار لازم در نظر گرفته شد تا اثر تنش در بولتها پس از باربرداری خنثی

جدول ۱: جدول مشخصات تیرها.

شماره نمونه	f'c * (MPa)	a	% P.T.	$\rho$ ***	حالت تقویت	خاموت برشی
1	37.5	L/4	0.075f'c	0.0097	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
2	37.5	L/4	0.075f'c	0.0097	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
3	37.5	L/4	0.075f'c	0.0145	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
4	37.5	L/4	0.075f'c	0.0145	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
5	34	L/4	0.075f'c	0.0097	تقویت قبل از ایجاد ترک **	دارد
6	34	L/4	0.04f'c	0.0097	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
7	34	L/4	0.04f'c	0.0097	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
8	34	L/4	0.04f'c	0.0145	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
9	33	L/4	-	0.0097	شکست کامل بدون تقویت	دارد
10	33	L/4	-	0.0145	شکست کامل بدون تقویت	دارد
11	33	L/4	-	0.0097	شکست کامل بدون تقویت	ندارد
12	33	L/4	-	0.0145	شکست کامل بدون تقویت	ندارد
13	35	L/6	0.075f'c	0.0097	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
14	35	L/6	0.075f'c	0.0097	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
15	35	L/6	0.04f'c	0.0145	تقویت قبل از ایجاد ترک	دارد
16	35	L/6	0.04f'c	0.0145	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
17	33	L/6	-	0.0097	شکست کامل بدون تقویت	دارد
18	33	L/6	-	0.0145	شکست کامل بدون تقویت	دارد
19	33	L/6	-	0.0097	شکست کامل بدون تقویت	ندارد
20	33	L/6	-	0.0145	شکست کامل بدون تقویت	ندارد
21	51	L/4	0.075 f'c	0.0145	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
22	51	L/4	0.04 f'c	0.0145	تقویت بعد از ایجاد ترک	ندارد
23	51	L/4	-	0.0145	شکست کامل بدون تقویت	ندارد
24	51	L/4	-	0.0097	شکست کامل بدون تقویت	دارد

\* میانگین مقاومت‌های فشاری بتن تیرهای ۱ الی ۲۰، ۲۴/۵ MPa است.

\*\* تیر شماره ۵ بدون استفاده از صفحه سراسری تقویت شده است.

\*\*\* مقدار  $(\rho_p + \rho')$  براساس میانگین مقاومت بتن تیرهای ۱ الی ۲۰، برابر ۰/۱۹۲ و برای تیرهای ۲۱ الی ۲۴ برابر ۰/۲۳۲ است. انتخاب مقدار  $\rho_p$  ۰/۵ با توجه به طراحی برای مناطق لرزه‌خیز در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: بارهای اولین ترک خمشی و برشی، ماکزیمم بار متحمل آزمایش و متناسبه شده براساس ACI.

شماره تیر	بار اولین ترک خمشی (kg)	بار اولین ترک برشی	P <sub>ACI</sub> (kg)	P <sub>MAX</sub> (kg)	P <sub>MAX</sub> /P <sub>ACI</sub>	تیر مبنا برای مقایسه	درصد افزایش مقاومت بعلت تقویت
1	1000	2600	2490	3100	1.27	9	9
2	1100	3100	2490	3240	1.32	11	30
3	1000	3600	3630	4600	1.26	10	18
4	1000	3600	3630	4000	1.1	12	48
5	1200	2600	2475	2900	1.19	9	2
6	1000	2400	2475	2900	1.19	9	2
7	1000	2600	2475	2800	1.15	11	12
8	1000	2800	3600	3900	1.07	10	0
9	1400	2100	2470	2850	1.17	-	-
10	1000	2800	3590	3900	1.08	-	-
11	1200	2200	2470*	2500	1.03	-	-
12	1100	2500	3590*	2700	0.75	-	-
13	1600	4000	3720	4400	1.2	17	0
14	1000	3800	3720	4600	1.26	19	18
15	1600	4000	5415	6200	1.14	18	11
16	1400	4200	5415	6000	1.1	20	43
17	1200	3200	3710	4600	1.26	-	-
18	1600	3800	5385	5600	1.03	-	-
19	1200	2600	3710*	3900	1.07	-	-
20	1600	2400	5385*	4200	0.77	-	-
21	1000	3000	3715	4500	1.22	23	96
22	600	3000	3715	4200	1.14	23	83
23	600	2000	3715*	2300	0.62	-	-
24	600	2600	3715	4300	1.16	-	-

\* این تیرها برای شکست برشی طراحی شده‌اند

## بارگذاری و آزمایش تیرها

نمونه‌ها که بصورت چهارتایی ساخته شده بودند، در یک مرحله (روز) تحت آزمایش قرار داده شدند. تکیه‌گاههای انتهایی از نوع

پس از رسیدن مقاومت بتن به مقدار مورد نظر، هر سری از

برشی و بار ماکزیمم ( $P_{max}$ ) ارائه شده است. همچنین با توجه به روابط موجود در آئین‌نامه ACI و در نظر گرفتن نوع شکست خمشی تیر، ماکزیمم بار متحمل تیرها (PACI) و بدون استفاده از ضرایب افزایش بار و کاهش ظرفیت محاسبه و در جدول آورده شده است. نسبت  $P_{max}/PACI$  برای کلیه تیرها نشان می‌دهد که این مقدار بیشتر از 1.0 است. بطور کلی کلیه تیرهای تقویت شده در برش، مقاومت خمشی بالاتر از مقدار طراحی خود را بدست آورده‌اند. در تیرهای با مقاومت بالا، شروع ترکهای خمشی در بارهای کمتری اتفاق افتاده است. همچنین با کاهش دهانه برش، ترکهای برشی در بارهای بزرگتری ایجاد شده‌اند.

#### اثر مقاومت بتن ( $f'_c$ )

برای بررسی اثر مقاومت بتن دو مقدار  $375 \text{ kg/cm}^2$  و  $510 \text{ kg/cm}^2$  در ۵۱۰ به ترتیب در تیرهای ۴ و ۲۱ در نظر گرفته شده و دیگر پارامترها در این تیرها مشابه می‌باشد (شکل ۲). افزایش میزان مقاومت حداکثر نسبت به مقاومت حداکثر تیر مینا به میزان ۲/۶٪ و ۴/۷٪ به ترتیب برای مقاومت‌های  $510 \text{ kg/cm}^2$  و  $375 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. تیرهای تقویت شده مستقل از مقاومت بتن، رفتار نرم و شکل پذیر را از خود نشان می‌دهند. بطور کلی شکل پذیری و منطقه

غلتکی بوده و بارگذاری بصورت دو نقطه‌ای توسط تیغه‌های مستطیل شکل و باریک روی تیر اعمال شد. مقاومت بتن، میانگین پنج نمونه بتن استوانه‌ای است. مطابق جدول (۱)، تیرها به سه صورت تحت آزمایش قرار گرفتند:

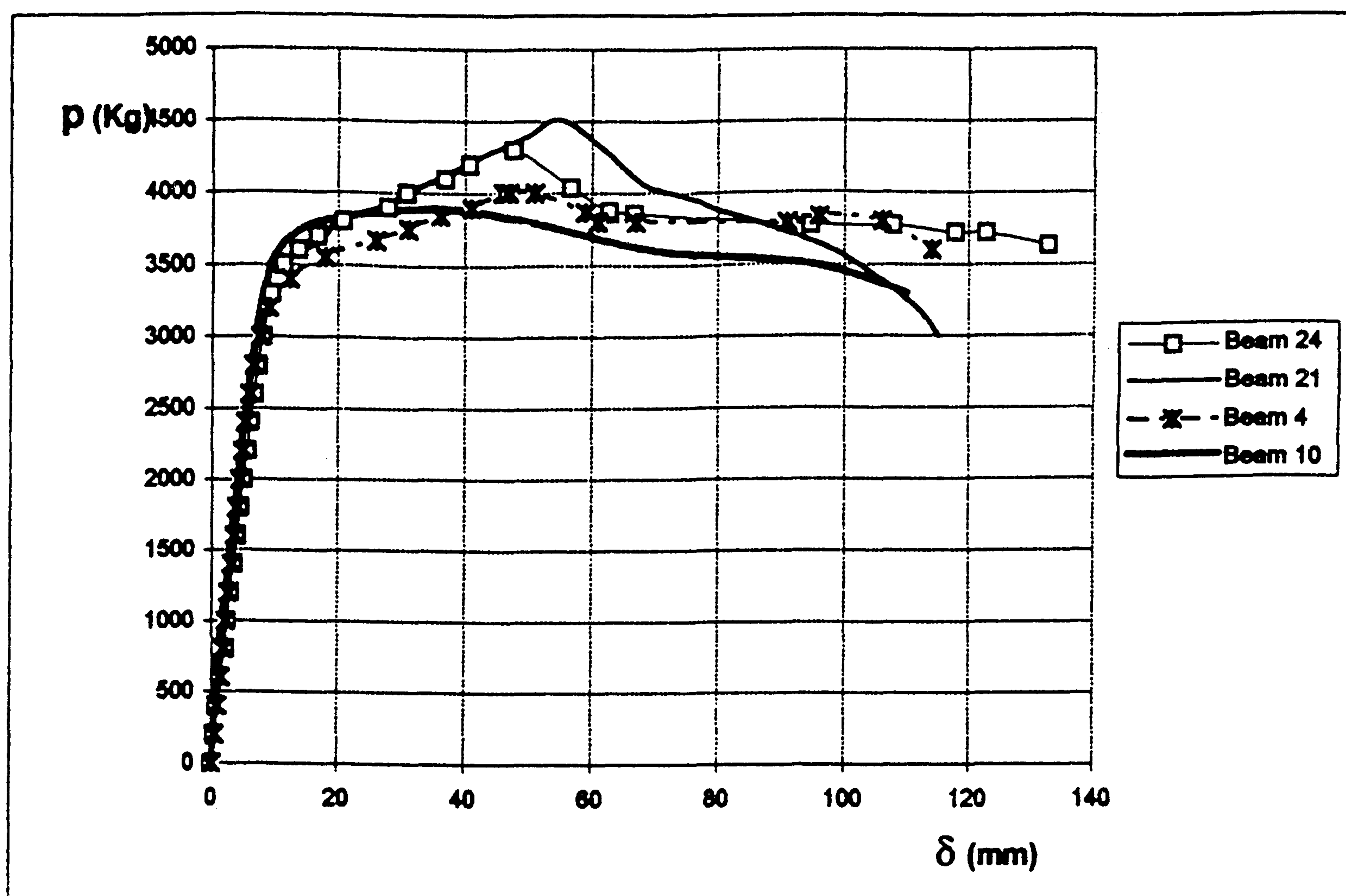
۱- تیرهای بدون خاموت یا با خاموت در منطقه برش بحرانی، که از ابتدا در منطقه راست و چپ برش بحرانی مقاومسازی شدند و سپس تا شکست کامل بارگذاری شدند.

۲- تیرهای بدون خاموت در منطقه بحرانی، که ابتدا تا ایجاد اولین ترک برشی اصلی تیر به عرض ۱ تا ۲ میلی‌متر بارگذاری شده، سپس منطقه برش بحرانی در دو طرف تیر با فشردن و بسته شدن کامل ترک تقویت شده و نهایتاً تا شکست کامل بارگذاری شدند.

۳- تیرهای با و بدون خاموت در منطقه برش بحرانی، که بدون تقویت تا شکست کامل بارگذاری شدند. این تیرها به عنوان مرجع برای مقایسه با دیگر تیرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خاموت‌های منطقه برش در این تیرها براساس آئین‌نامه ACI طراحی شده و دارای فاصله ۳cm بودند.

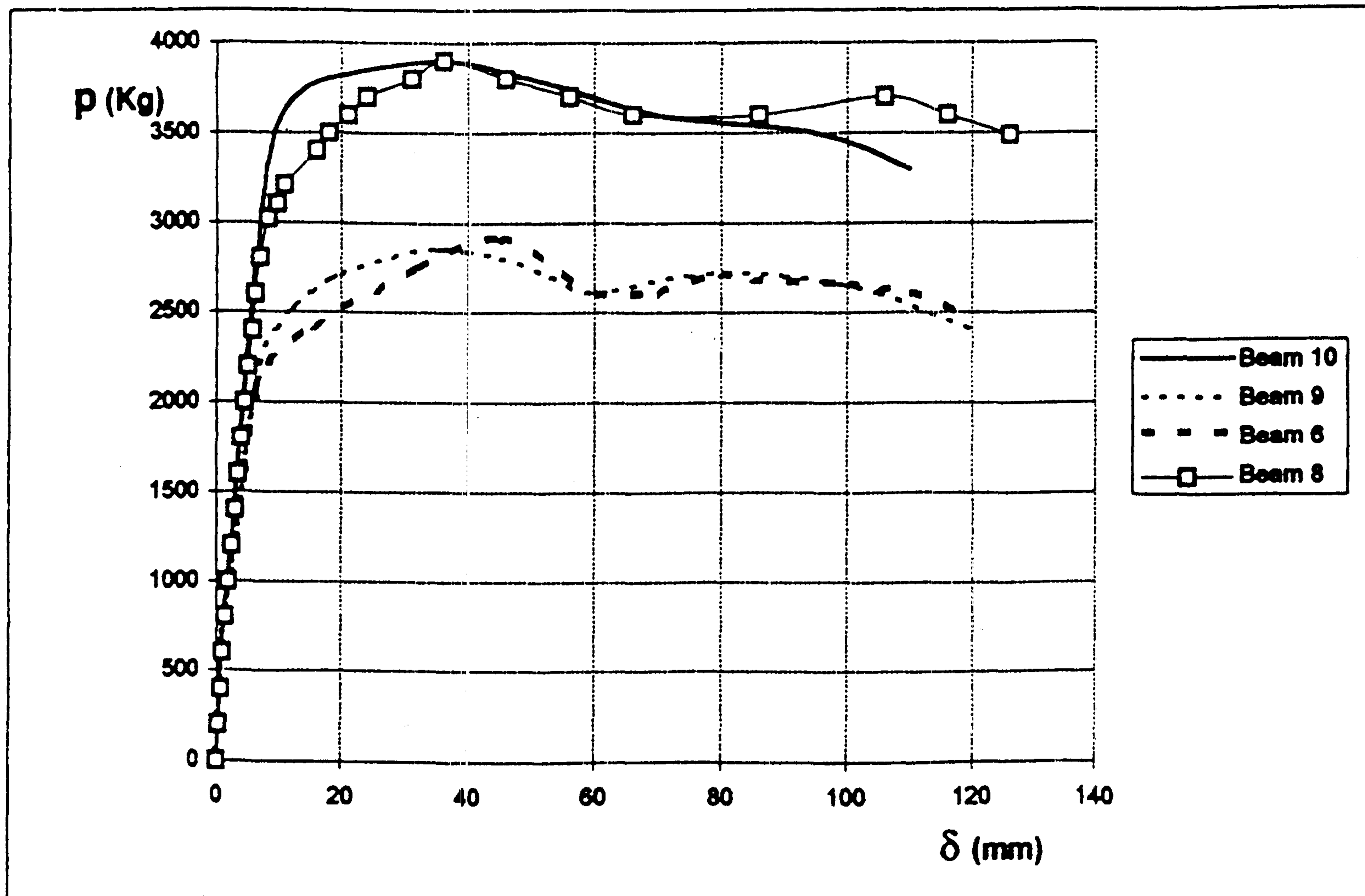
#### نتایج آزمایشها و بحث پیرامون آنها

در جدول (۲) بار مربوط به ایجاد اولین ترک خمشی، ترک



شکل ۲: منحنی بار - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۴ و ۲۱ با مقاومت فشاری مختلف.

$$(a = \frac{1}{4} \text{ و } \%P.T. = 0.075f'_c, \rho = 0.0145)$$



شکل ۳: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۶ و ۸ با مقدار فولاد کششی متفاوت.

$$(f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2 \text{ و } \%P.T. = 0.04f'_c, a = \frac{1}{4})$$

#### اثر دهانه برش (a)

بطور نمونه تیرهای ۸ و ۱۵ به همراه تیرهای مبنای متناظر ۱۰ و ۱۵ در شکل (۴) ارائه شده‌اند. میزان افزایش در مقاومت تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای مبنای ترتیب برابر صفر درصد و ۱۰/۷ درصد می‌باشد. در مجموع با ایجاد پس فشردگی، مقاومت و شکل‌پذیری در تیر تقویت شده بسیار نزدیک به تیر مبنای بوده و شکست خمشی نرم در تیرهای تقویتی ایجاد شده است. همچنین اثر دهانه برش (a) روی مقاومت و شکل‌پذیری در حضور نیروی پس فشردگی محسوس نیست.

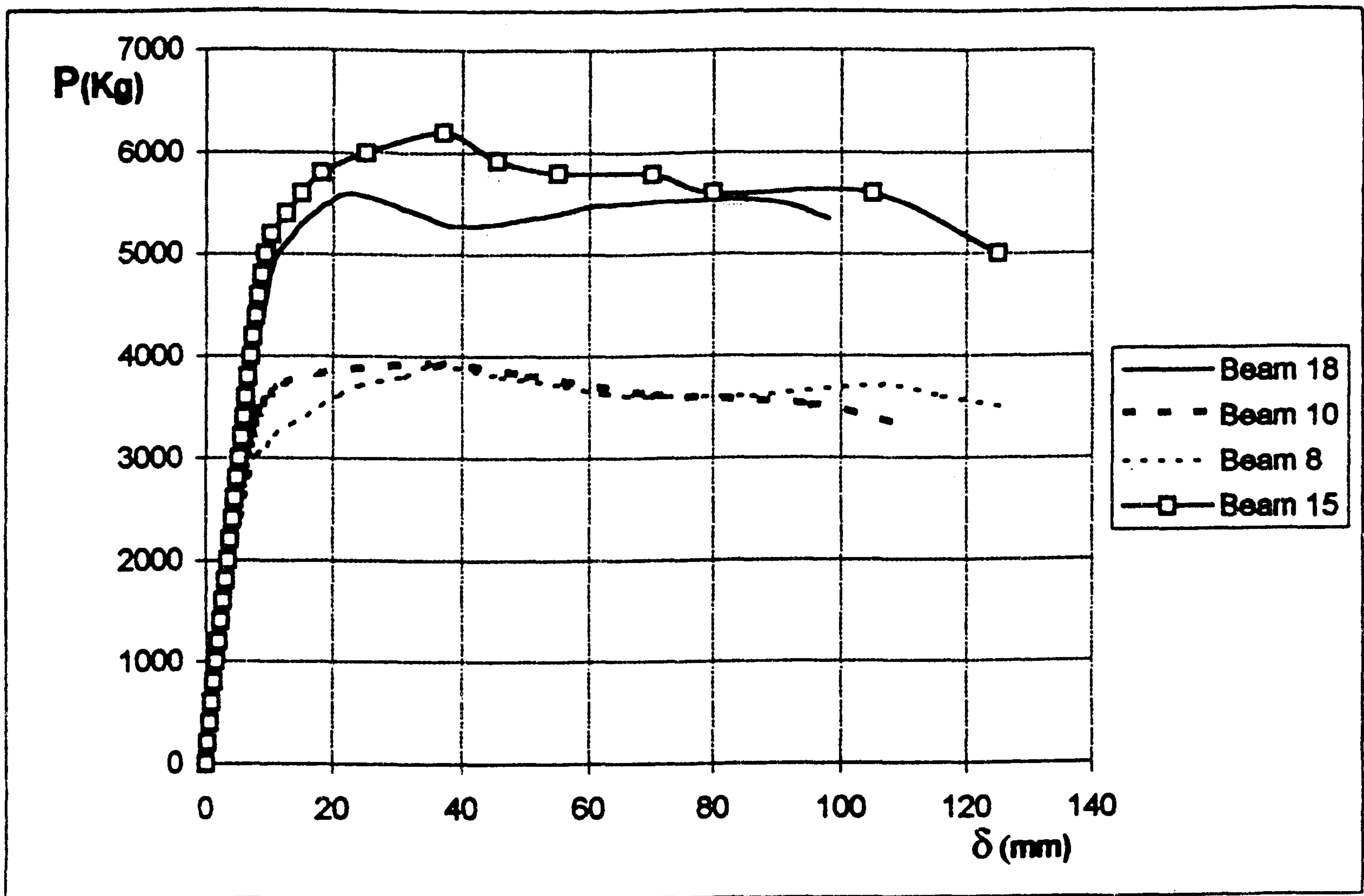
#### اثر مقدار نیروی پس فشردگی (%P.T.)

بعنوان نمونه در این بخش مقایسه تیرهای ۲ و ۷ به همراه تیر مبنای ۹ و مقاومت براساس آئین‌نامه ACI در شکل (۵) ارائه شده است. بطور کلی با افزایش مقدار نیروی پس فشردگی در منطقه برش مقاومت و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. برای تیرهای با بتن معمولی با افزایش نیروی پس فشردگی از  $0.04f'_c$  به  $0.075f'_c$  مقاومت تیر ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. سختی تیرهای تقویت

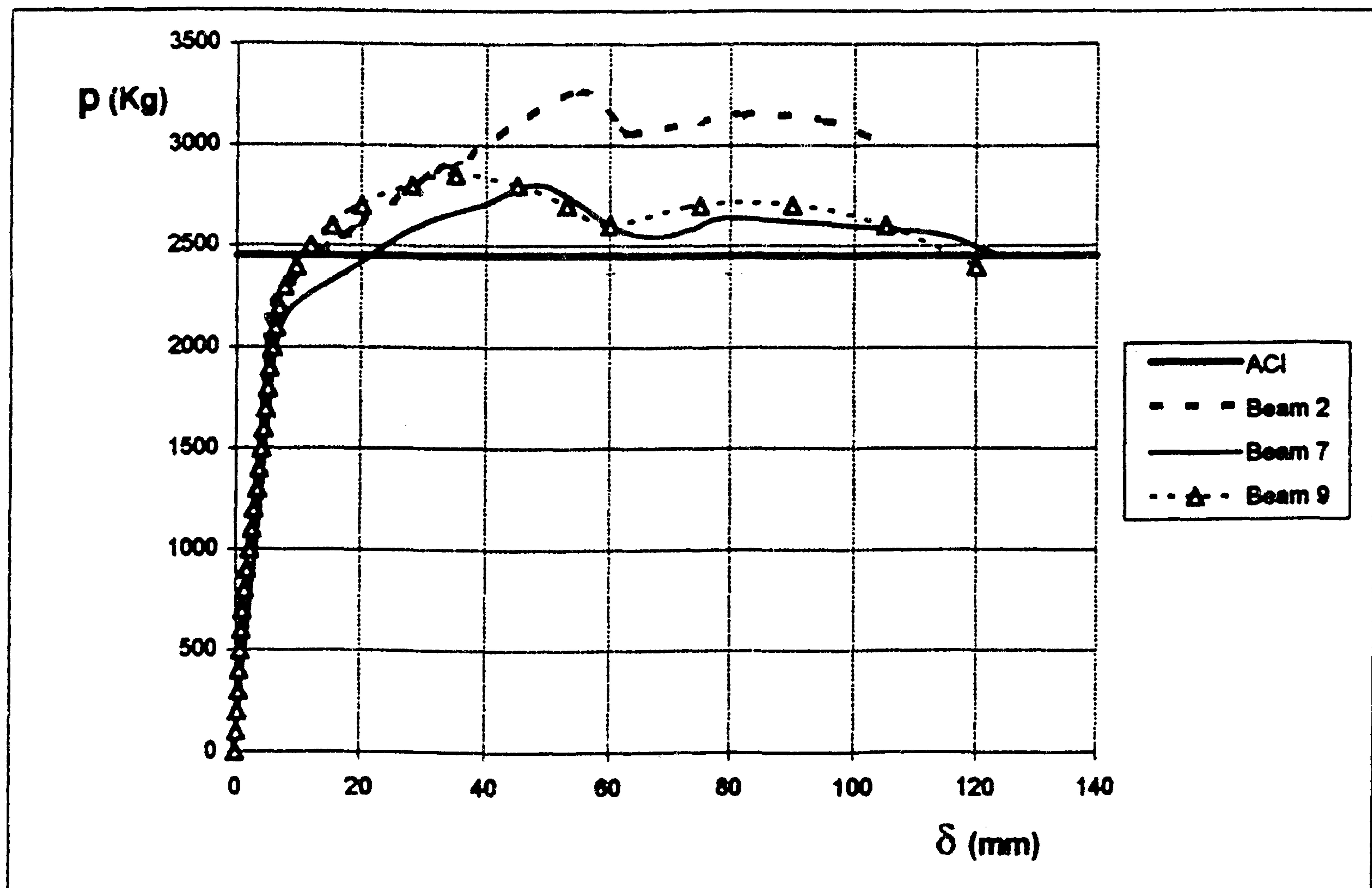
پلاستیک تیرهای فاقد خاموت برشی پس از تقویت بسیار نزدیک به تیرهای مبنای با خاموت برشی بوده و روش تقویت بطور مؤثر و محسوس عمل کرده است.

#### اثر مقدار آرماتور طولی کششی ( $\rho$ )

بطور نمونه در شکل (۳) مقایسه تیرهای ۶ و ۸ با  $\rho$  مختلف ارائه شده است. مقدار  $\rho$  برای تیرهای ۶ و ۸ به ترتیب برابر با ۰/۰۰۹۷ و ۰/۰۱۴۵ می‌باشد. مقاومت تیرهای تقویت شده در مقایسه با تیر مبنای برابر با ۱/۸ درصد افزایش و بدون تغییر، به ترتیب در تیرهای ۶ و ۸ است. عبارتی دیگر برای هر دو مورد  $\rho$  با ایجاد تقویت در منطقه برش، مقاومت خمشی به اندازه مقاومت خمشی تیر مبنای فراهم شده است. همچنین با اعمال پس فشردگی شکل‌پذیری به نحو مطلوبی و تقریباً برابر تیر مبنای ایجاد شده است. بطور کلی تأثیر افزایش  $\rho$  روی مقاومت و شکل‌پذیری در تیرهای تقویت شده نسبت به تیر مبنای محسوس نیست و همچنین رفتار تیرهای مبنای و تقویت شده در محدوده خطی و الاستیک تفاوت عمده را نشان نمی‌دهند.



شکل ۴: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۸ و ۱۵ با طول منطقه برش (a) متفاوت.  
 $(f'_c \cong 340 \text{ kg/cm}^2$  و  $\%P.T. = 0.04 f'_c$ ،  $\rho = 0.0145$ )



شکل ۵: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۲ و ۷ با  $\%P.T.$  متفاوت.  
 $(f'_c \cong 350 \text{ kg/cm}^2$  و  $a = \frac{1}{4}$ ،  $\rho = 0.0097$ )



### اثر وجود صفحه سراسری

اثر این عامل با مقایسه تیر ۱ (با وجود صفحه سراسری) و تیر ۵ (بدون صفحه سراسری)، بررسی شده است (شکل ۷). سختی ناحیه خطی هر دو تیر تقریباً یکسان بوده و ابتدای ناحیه پلاستیک دو تیر نیز یکسان است، اما تیر ۱، بار نهایی بالاتری دارد و افزایش مقاومت در حدود ۷ درصد را نسبت به تیر ۵ نشان می‌دهد. مقدار افزایش قابلیت جذب انرژی تا تغییر مکان ۹۵mm در تیر ۱ نسبت به تیر ۵، برابر ۵ درصد است. شکل پذیری تیر ۱ اندکی بیش از تیر ۵ بوده و در تیر ۵ نیز شکست خمشی نرم مشاهده می‌شود.

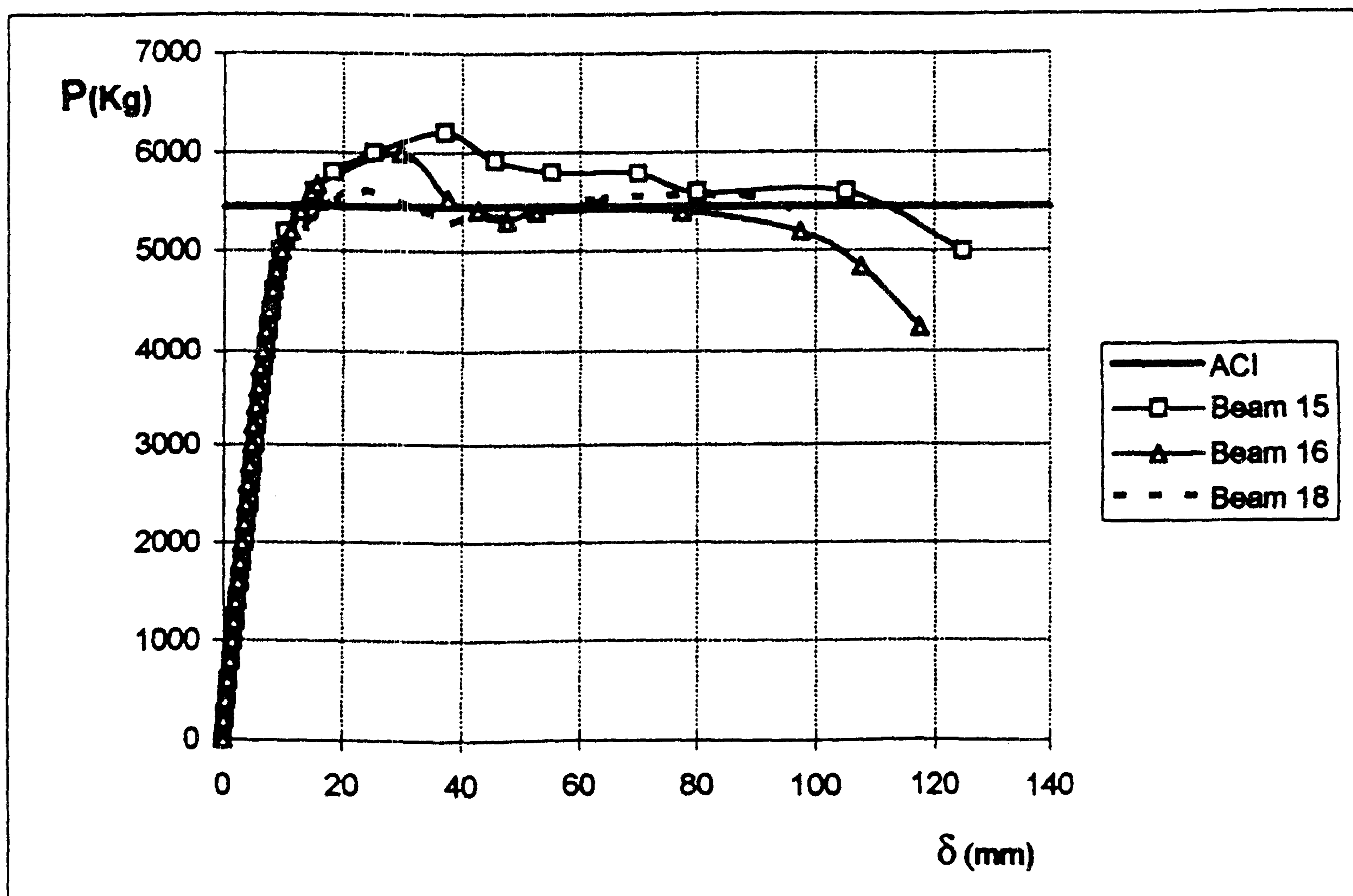
### اثر تقویت تیر در مقایسه با تیرهای مینا (با یا بدون خاموت)

تیرهای بهسازی شده فاقد خاموت در منطقه برش بحرانی با تیرهای تقویت نشده فاقد خاموت و تیرهای دارای خاموت برای کنترل برش و در این پژوهش، جهت تعیین و ارزیابی میزان کارایی روش تقویت مقایسه می‌گردند. شکل (۸) نمونه‌ای از این مقایسه را برای تیرهای با بتن معمولی نشان می‌دهند. مقایسه رفتار تیرهای ۹، ۲ و ۱۱ نشان می‌دهد که تیر فاقد خاموت و تقویت (تیر ۱۱)

شده با پس فشردگی بیشتر، اندکی بیشتر است. قابلیت جذب انرژی در تیر با پس فشردگی بیشتر تا تغییر مکان ۱۰۵mm، حدود ۱۴ درصد بیشتر از تیر با پس فشردگی کمتر است. بطور کلی با ایجاد مقدار جزئی پس فشردگی ( $0.04f'_c$ ) تیر تقویتی مقاومت و شکل پذیری به میزان تیر مینا را کسب می‌کند.

### اثر تقویت قبل یا بعد از ایجاد ترک

تقویت تیرها به دو صورت تقویت قبل و بعد از ایجاد ترک برشی انجام شده است. به صورت نمونه رفتار تیرهای ۱۵ (تقویت شده از ابتدا) و ۱۶ (تقویت شده پس از ایجاد ترک برشی)، به همراه تیر مینا و مقاومت براساس آئین‌نامه ACI در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. مقاومت نهایی تیر تقویت شده از ابتدا حدود ۳/۵ درصد بیشتر از تیر تقویت شده پس از ایجاد ترک برشی و قابلیت جذب انرژی حدود ۱۰ درصد بیشتر است. توجه شود که تیرهای تقویت شده از ابتدا، در منطقه برش بحرانی برای برش طراحی شده و دارای خاموت کافی می‌باشند. بطور کلی مقاومت، قابلیت جذب انرژی و شکل پذیری تیرهای تقویت شده از ابتدا اختلاف قابل ملاحظه‌ای با تیرهای تقویت شده پس از ایجاد ترک برشی ندارند.

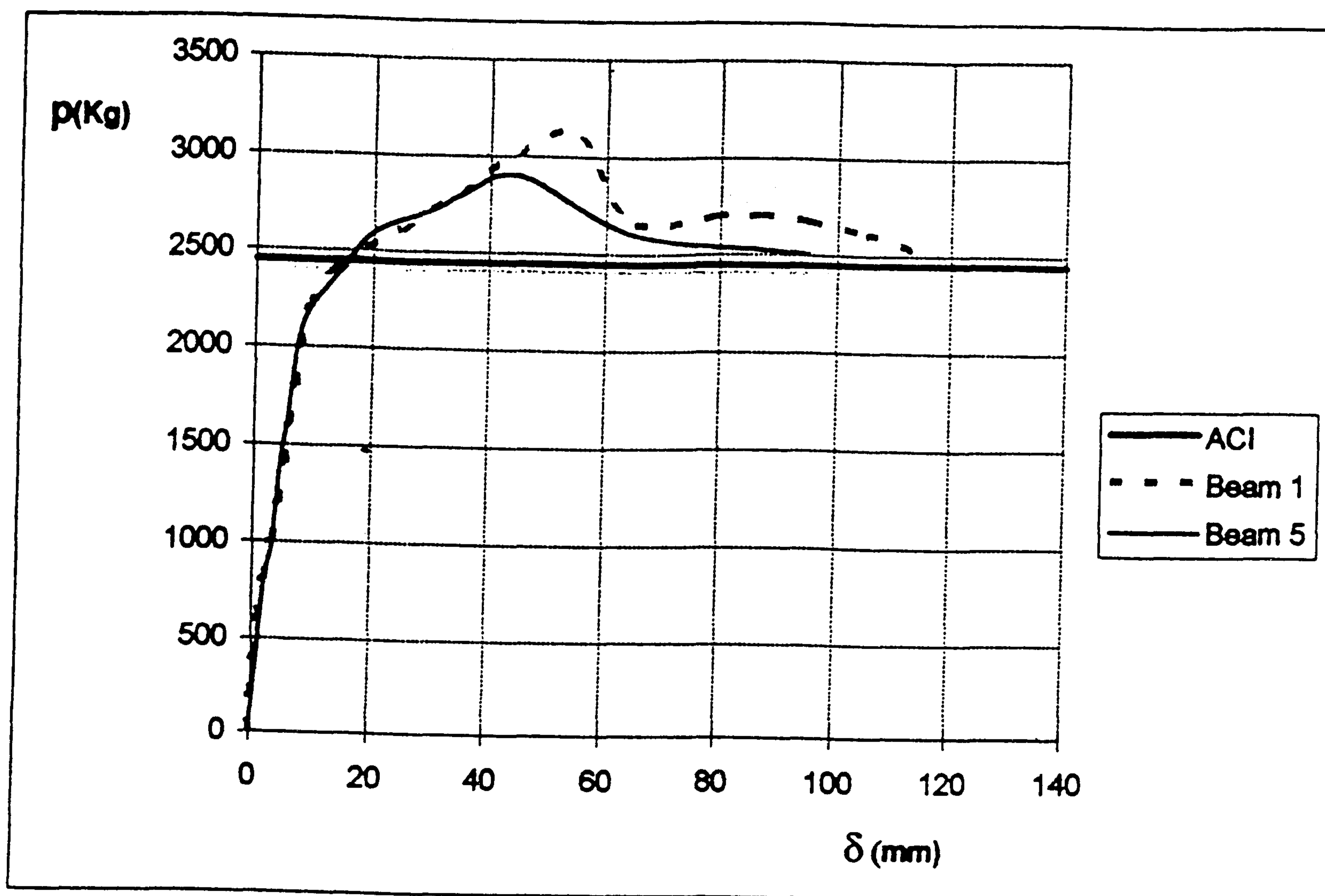


شکل ۶: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۱۵ و ۱۶ با حالت تقویت متفاوت.

$$(f'_c \cong 340 \text{ kg/cm}^2 \text{ و } \%P.T. = 0.04f'_c, a = \frac{1}{6}, \rho = 0.0145)$$

مکان ۸۰mm در تیر ۲ نسبت به تیر ۱۱ بترتیب حدود ۳۰٪ و ۱۸۰٪ می‌باشد. شکل‌پذیری تیر تقویت شده قدری بیشتر از تیر مینا بوده و شکست ترد برشی تیر ۱۱ را تبدیل به شکست قابل قبول خمشی نرم کرده است.

لحظه‌ای پس از ایجاد ترک برشی شکست تردی را دارا بوده، درحالی که تیر ۲ فاقد خاموت ولی با تقویت، مقاومت و شکل‌پذیری همانند تیر مینا (تیر ۹ با خاموت و بدون تقویت) را از خود نشان می‌دهد. افزایش مقاومت و قابلیت جذب انرژی تا تغییر



شکل ۷: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۱ و ۵ با صفحه سراسری و بدون صفحه سراسری.

$$(f'_c \cong 360 \text{ kg/cm}^2 \text{ و } \%P.T. = 0.075f'_c, a = \frac{1}{4}, \rho = 0.0097)$$

رفتار نرم خمشی با مقدار پس‌فشرده‌گی نسبتاً پائین ( $f'_c / 0.04$ ) فراهم می‌آورد.

### توجیه و پیش‌بینی تئوریک بار و نوع شکست

برای تعیین ظرفیت تئوریک شکست برشی تیرها از المانهای تنش و بسط تنشها برروی دایره موهر استفاده شده است. برای هر تیر سه المان در ناحیه برش بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. المان ۱ روی تار خنثی در وسط عمق ناحیه بحرانی، المان ۲ در سطح فوقانی بتن تیر و در زیر ورق تقویتی و المان ۳ در سطح پائین بتن تیر در گرفته شده، که المان ۱ تحت برش-فشار، المان ۲ تحت فشار-فشار و المان ۳ تحت کشش-فشار می‌باشد (شکل ۱۰). در محاسبات فرض شده است که عملکرد ورقها با تیر بطور یکپارچه و با هم (یکنواخت) می‌باشد. بدین معنی که کرنشها و انحنای تیر و ورق در محل تماس یکسان خواهد بود. لذا باید چسبندگی و عدم

### نحوه شکست تیرها

شکل (۹) نحوه شکست تیرهای آزمایش شده به همراه خطوط ترک را نشان می‌دهد. از این شکلها ملاحظه می‌گردد که تیرهای فاقد خاموت و تقویت نشده در منطقه برش بحرانی (تیرهای ۱۱، ۱۲، ۱۹، ۲۰ و ۲۳) شکست ترد برشی و احتمالاً قبل از به تسلیم رسیدن فولاد طولی کششی را تجربه کرده‌اند. در حالی که کلیه تیرهای فاقد خاموت برشی در منطقه برش بحرانی و تقویت شده پس از ایجاد ترک برشی (تیرهای ۲، ۴، ۷، ۱۴، ۱۶، ۲۱ و ۲۲) شکست نرم خمشی با تسلیم شدن فولادهای طولی کششی و فشاری و خردشدگی ناحیه فشاری بتن و نسبت تغییر مکان به طول تیر به مقدار قابل توجه ۶/۴ درصد تا ۷/۶ درصد را از خود نشان داده‌اند. بعبارتی دیگر شکست تیرهای تقویت شده همانند تیرهای مینا (مقاوم در برابر برش) می‌باشد. لذا روش تقویت بصورت پس‌فشرده‌گی بسیار مؤثر بوده و تغییر رفتار ترد برشی را به

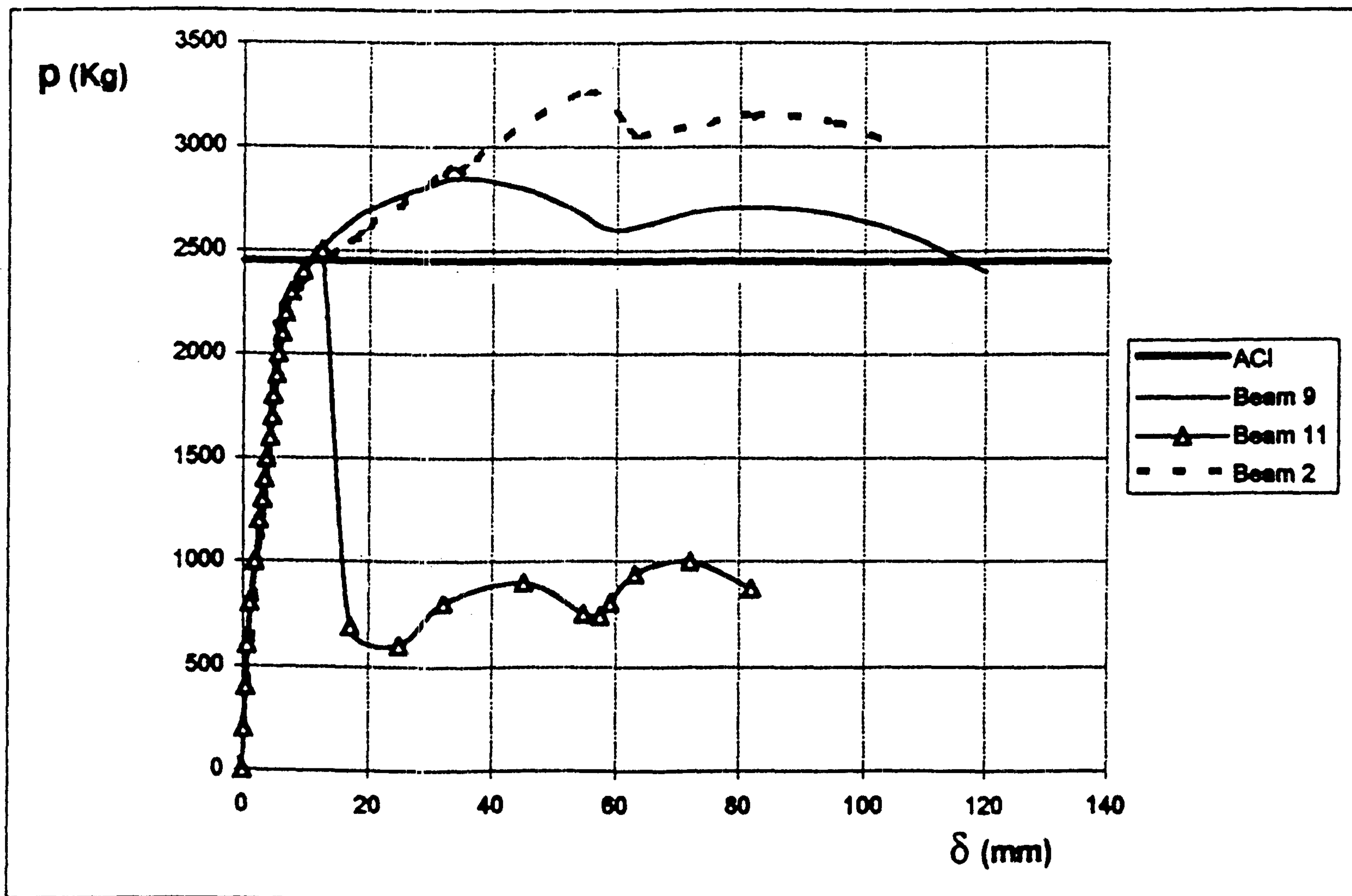
شکست متعلق به تیر ۱۵ محاسبه شده و نهایتاً مقدار تنش برشی

در سطح بین ورق و بتن بصورت زیر بدست می آید:

$$\tau = \frac{VQ}{It} = \frac{3100 \times 192/3}{5634 \times 8} = 13/23 \text{ kg/cm}^2$$

مقدار ضریب اصطکاک در محدوده  $1 < \mu < 4$  قرار دارد [۸]. این ضریب را بطور محافظه کارانه برابر  $1/10$  در نظر می گیریم، لذا داریم،  $\mu f_p = 1/10 \times 0/04 \times 350 = 14 \text{ kg/cm}^2 > 13/23 \text{ kg/cm}^2$  با در نظر گرفتن حداقل نیروی پس فشردگی و حداکثر بار شکست، مشاهده می گردد که همواره تماس بین ورقها و بتن در کلیه تیرها حفظ خواهد شد.

لغزش ورق بر روی تیر با اصطکاک بین لاستیک و بتن، و لاستیک و فولاد تأمین گردد. مشخصات مقطع با فرض عملکرد مقطع بصورت مرکب محاسبه می شود و سپس تنش برشی در محل تماس ورق و بتن محاسبه شده و با تنش اصطکاکی مقایسه می گردد. ضخامت دو ورق ۴ میلی متری به همراه مقطع بتنی در نظر گرفته می شود. همچنین براساس مشاهدات آزمایشگاهی مقطع در ناحیه برشی بحرانی بصورت ترک نخورده فرض می شود. مقادیر خواص مقطع شامل  $I = 5634 \text{ cm}^4$ ,  $Q_{bot} = 173/8 \text{ cm}^3$ ,  $Q_{top} = 192/3 \text{ cm}^3$  و مقدار برش برابر  $V = P/2 = 6200/2 = 3100 \text{ Kg}$  (برای بالاترین بار



شکل ۸: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ۹، ۲ و ۱۱.

$$(f'_c \cong 350 \text{ kg/cm}^2 \text{ و } a = \frac{1}{4}, \rho = 0.0097)$$

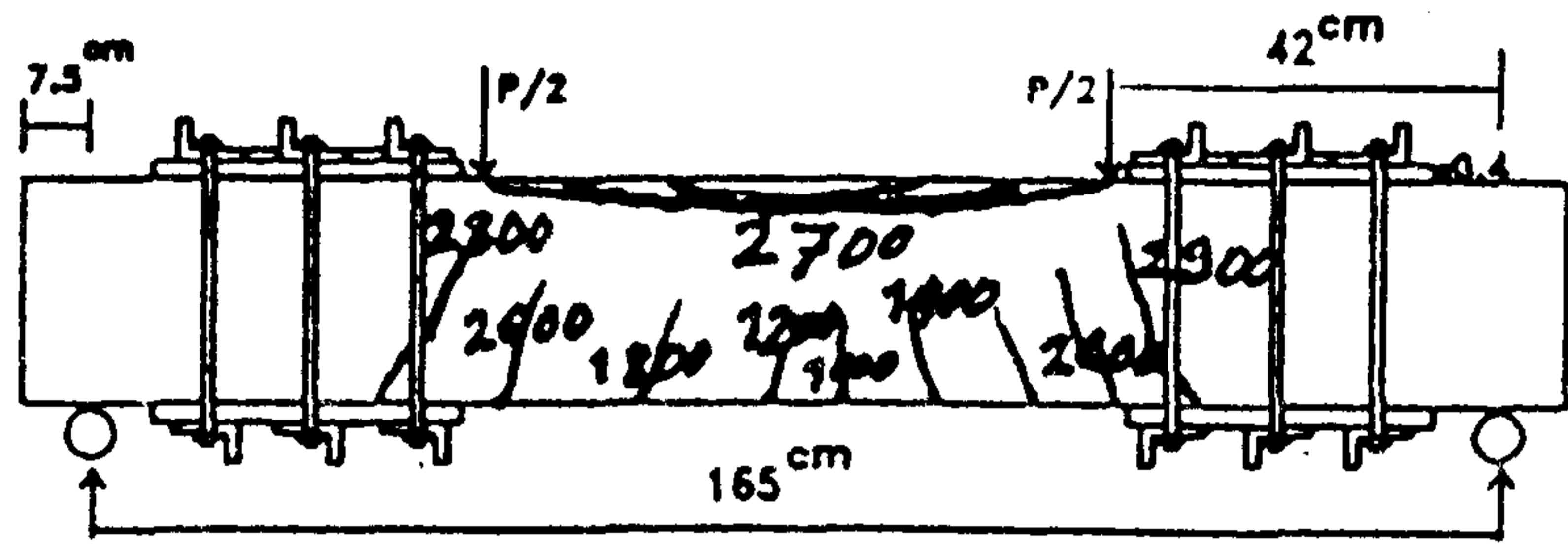
### المان ۱

این المان در وسط مقطع تیر قرار دارد و مقدار تنش برشی در آن برابر  $\tau = 31 \text{ kg/cm}^2$  است. با در نظر گرفتن تنش برشی  $31 \text{ kg/cm}^2$  و فشار برابر  $f'_c = 14 \text{ kg/cm}^2$  روی المان، مقادیر تنش های ماکزیمم و مینیمم بترتیب فشاری  $31/8 \text{ kg/cm}^2$  و کششی  $24/8 \text{ kg/cm}^2$  نتیجه می شوند. بنابراین حداکثر تنش کششی موجود در این المان کمتر از ظرفیت کششی بتن است و شکست از نوع برشی نخواهد بود، که این امر با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت دارد. همچنین طبق این تئوری سایر تیرهای دارای

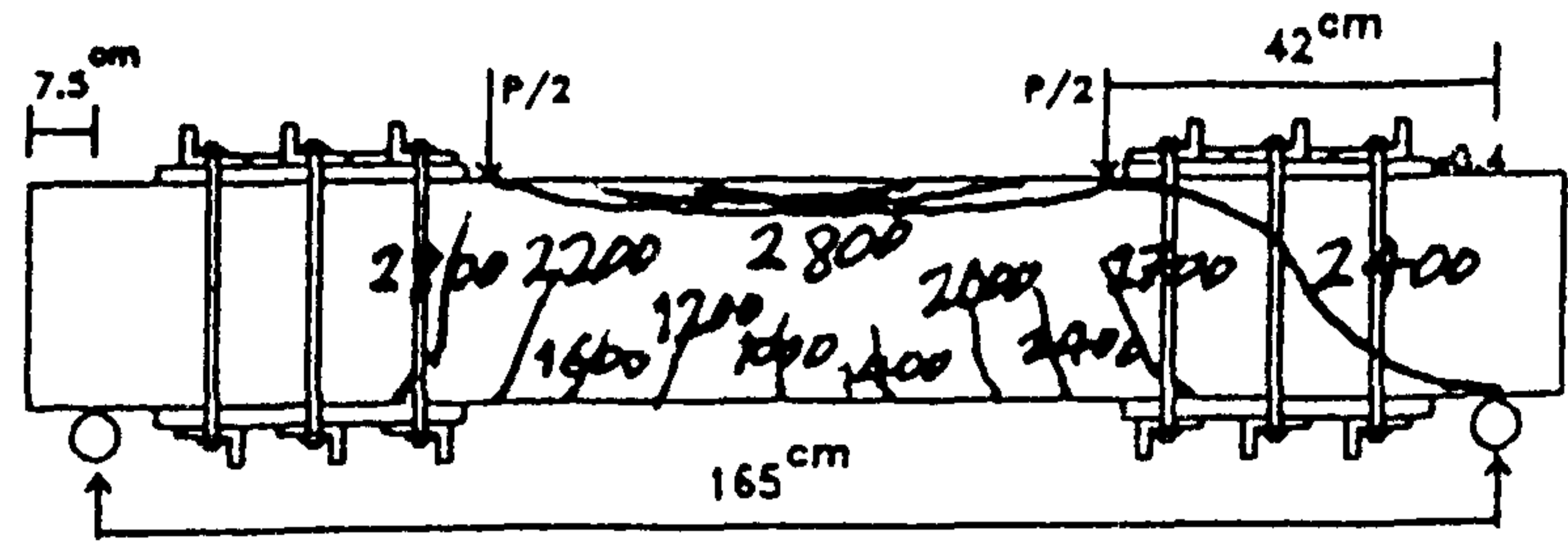
همچنین مقطع ناحیه بحرانی، در تیرهای تقویت شده را می توان بصورت مرکب و یکپارچه در نظر گرفت. مقدار تنش کششی مجاز بتن برابر با  $f_t = 2\sqrt{f'_c} = 37/4 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است [۵]. بعبارتی دیگر جهت ایجاد ترک در بتن باید تنش کششی حداکثر در المان انتخابی از این مقدار فراتر رود. چنانچه خاموت موجود باشد، خاموتها وارد عمل شده و در غیر اینصورت با گسترش ترک شکست برشی رخ می دهد. چنانچه ظرفیت برشی تیر از بار اعمالی بیشتر باشد، تیر شکست خمشی را تجربه می کند. بطور نمونه تیر ۱۵ را مورد بررسی قرار می دهیم.

روی این تیر نمونه با استفاده از المان تنش مربوطه محاسبه شده و مقدار ۷۲۵۲ kg بدست می آید.

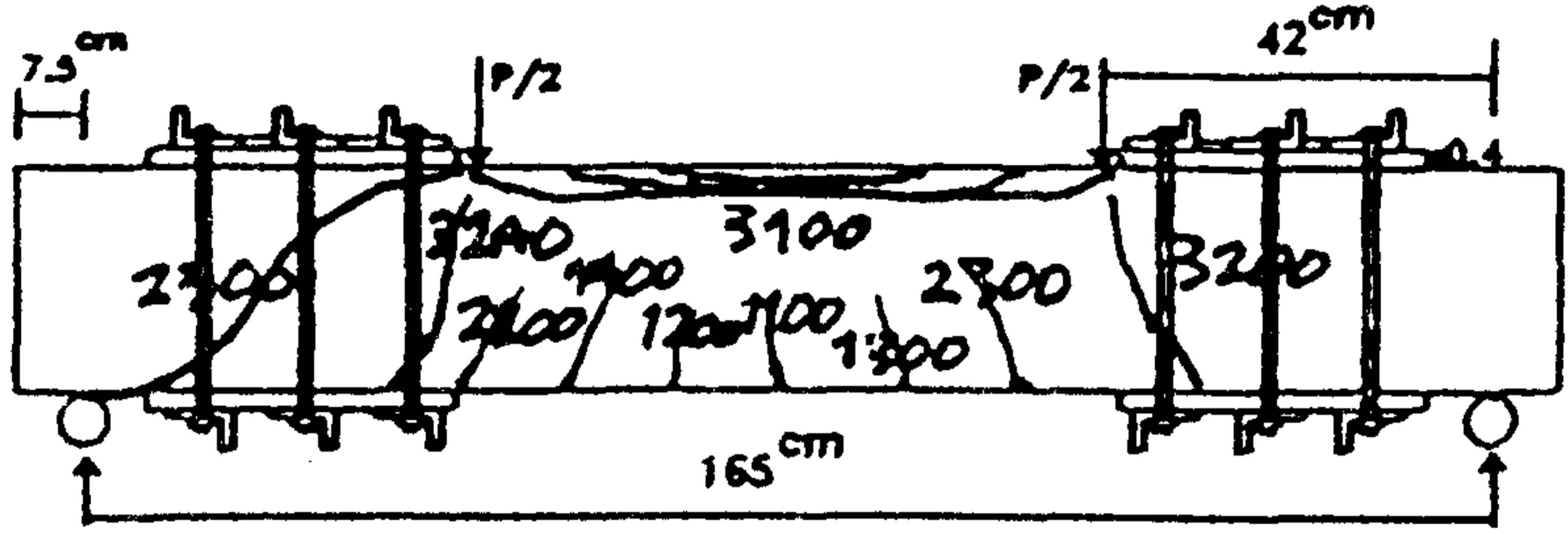
نیروی پس فشردگی مشابه و بیشتر تحت مود خمشی شکسته می شوند. از طرفی دیگر حداکثر بار قابل اعمال برای شکست برشی.



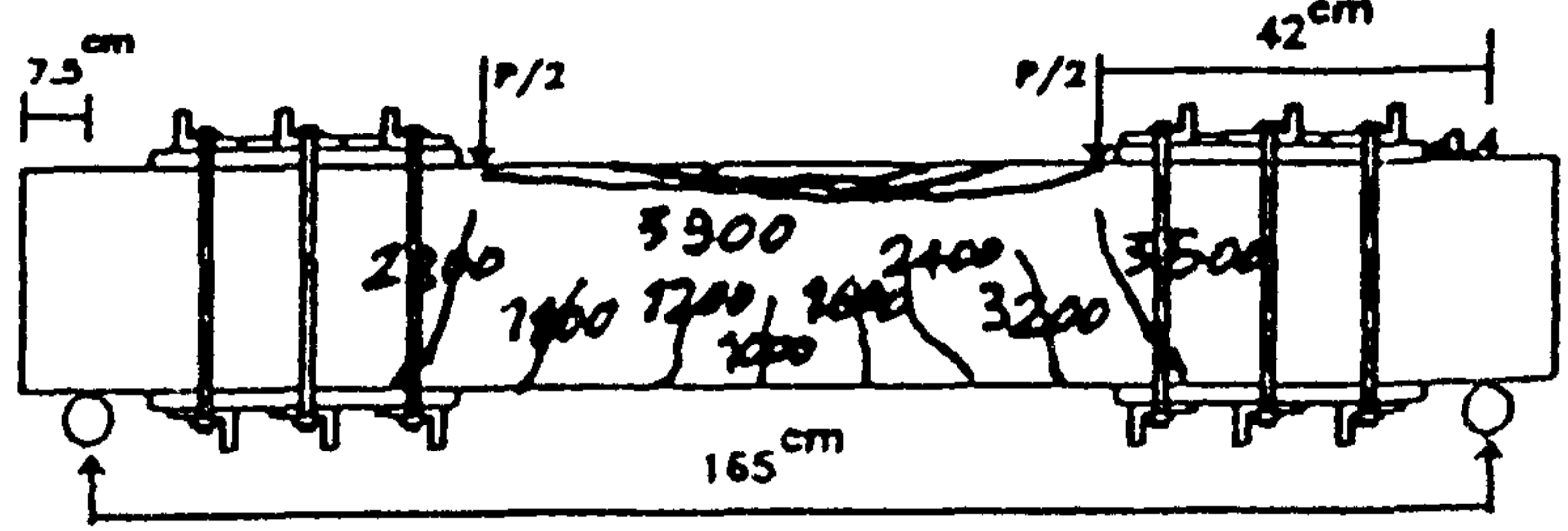
①



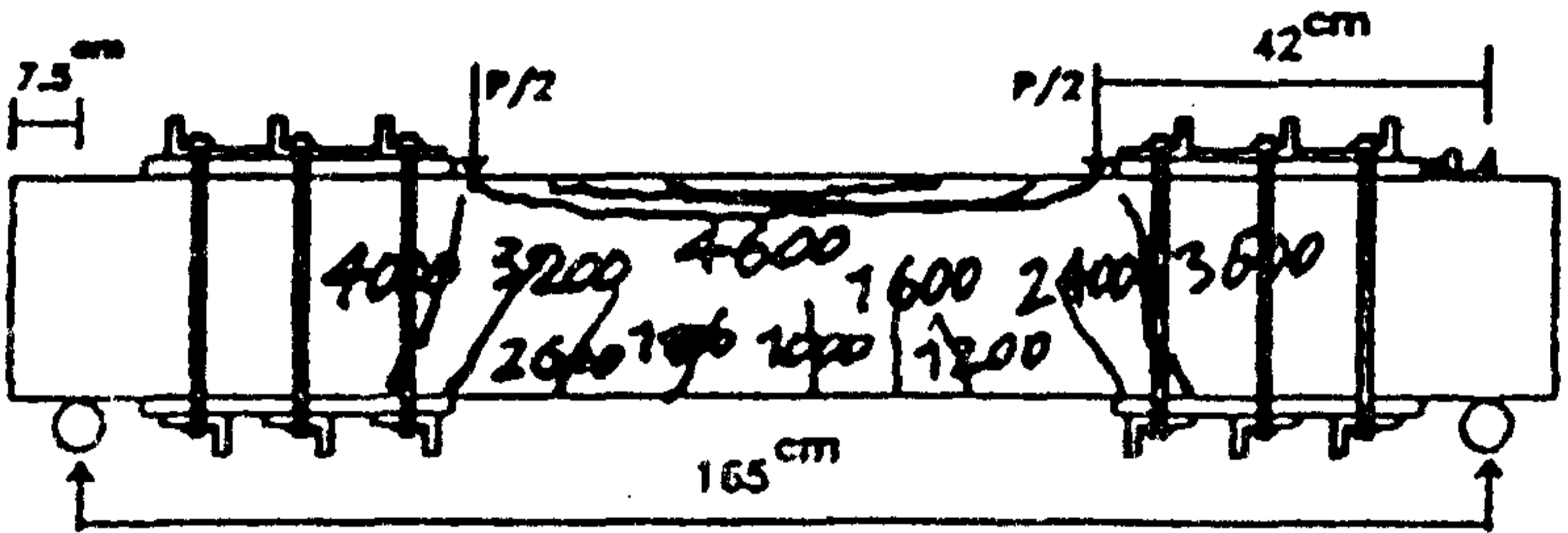
⑦



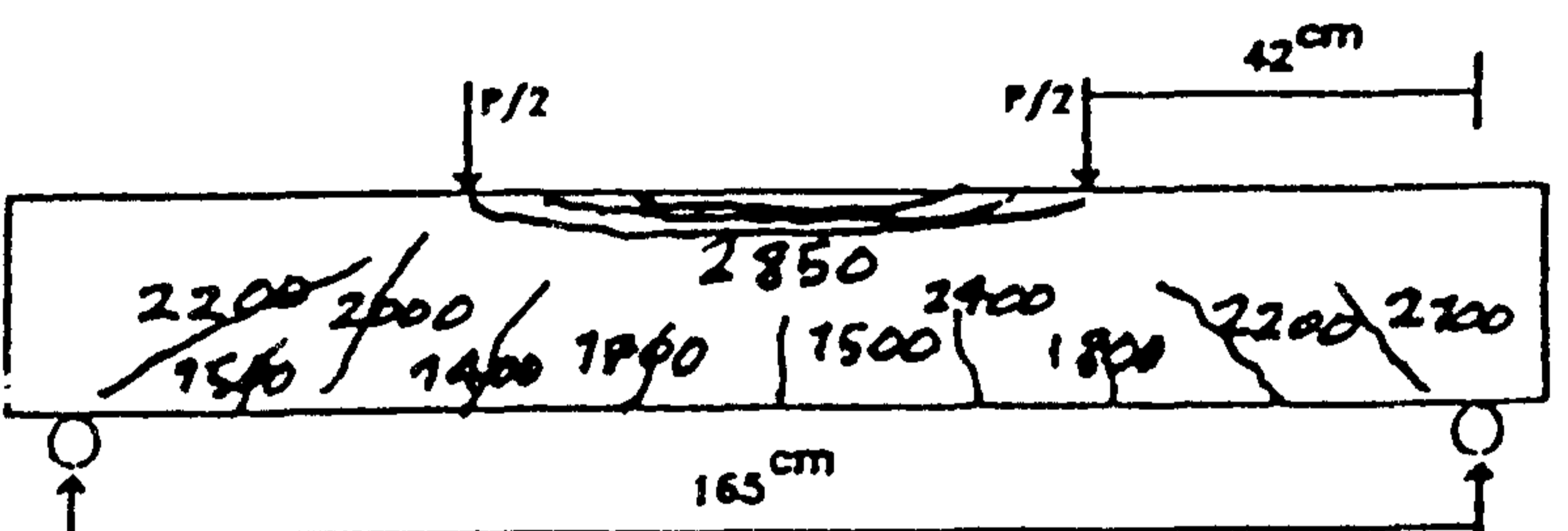
②



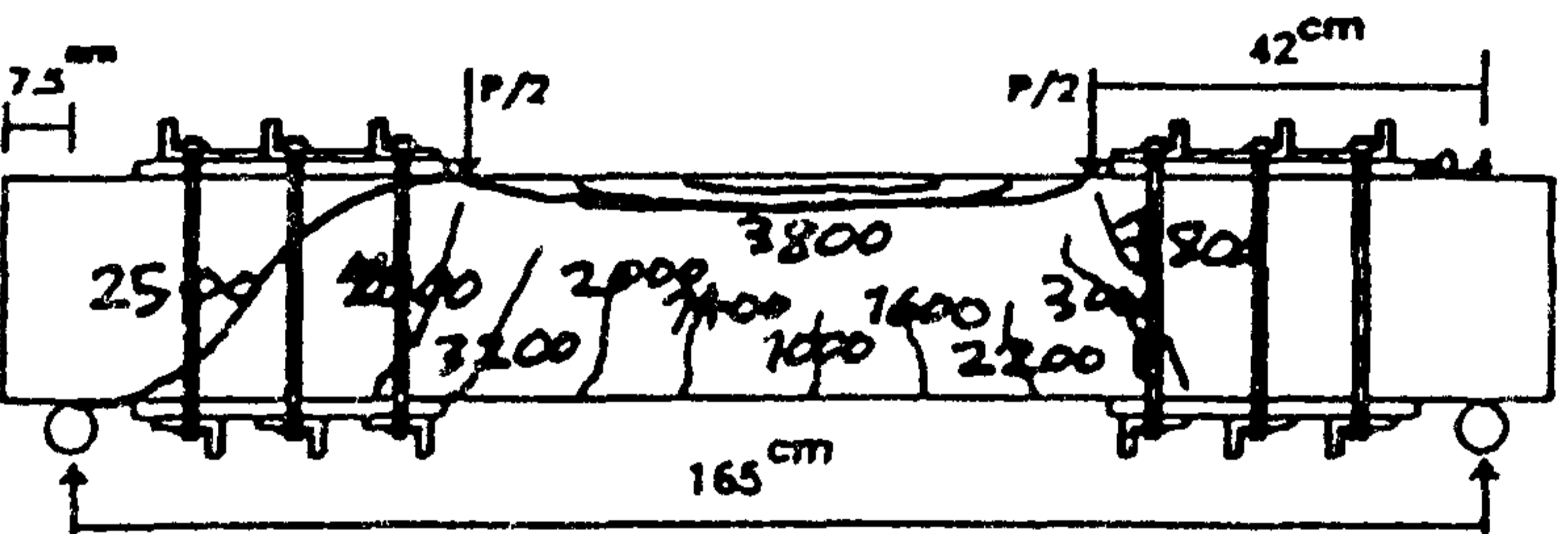
⑧



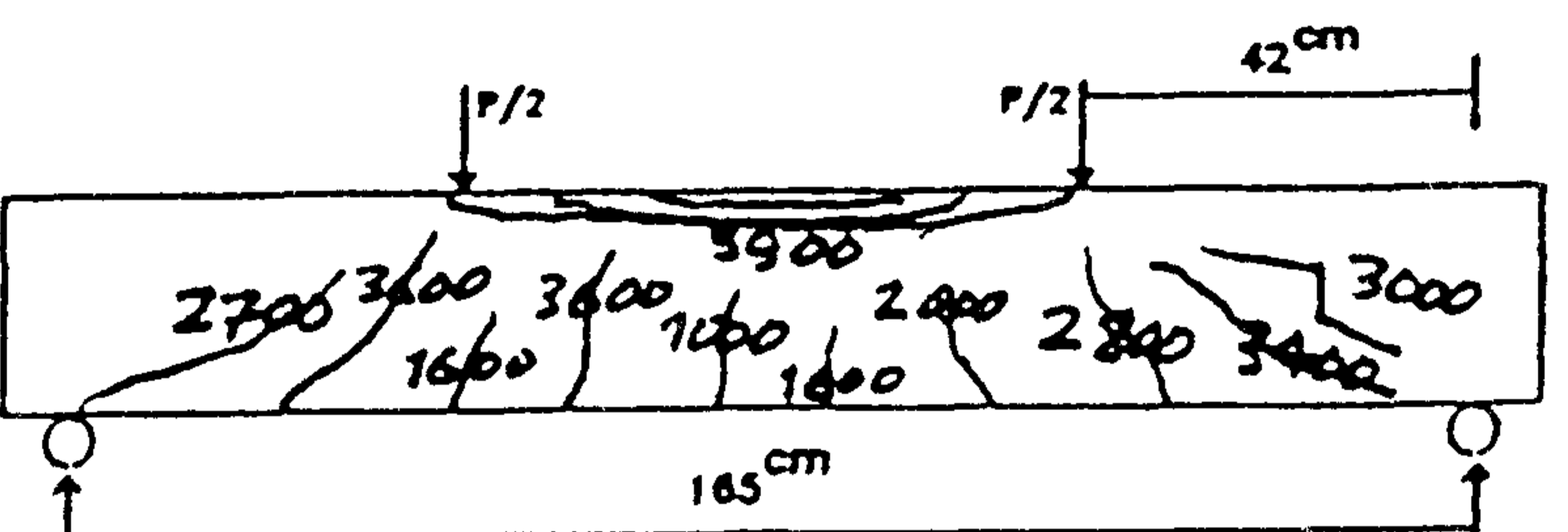
③



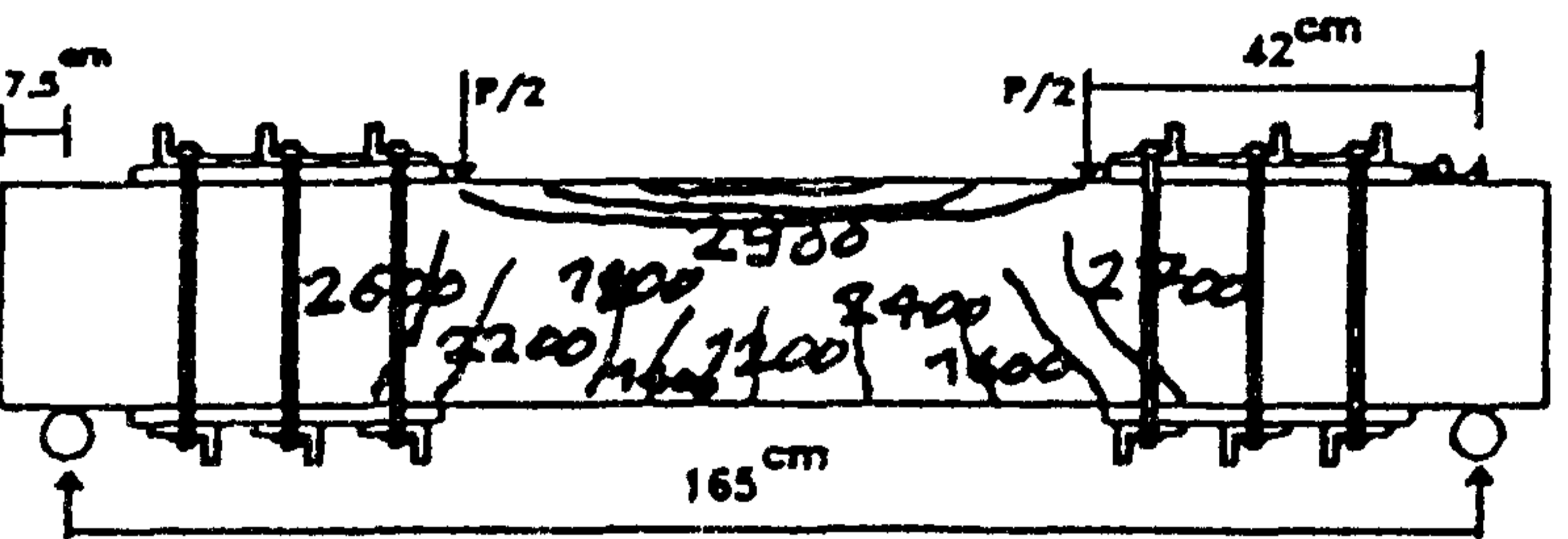
⑨



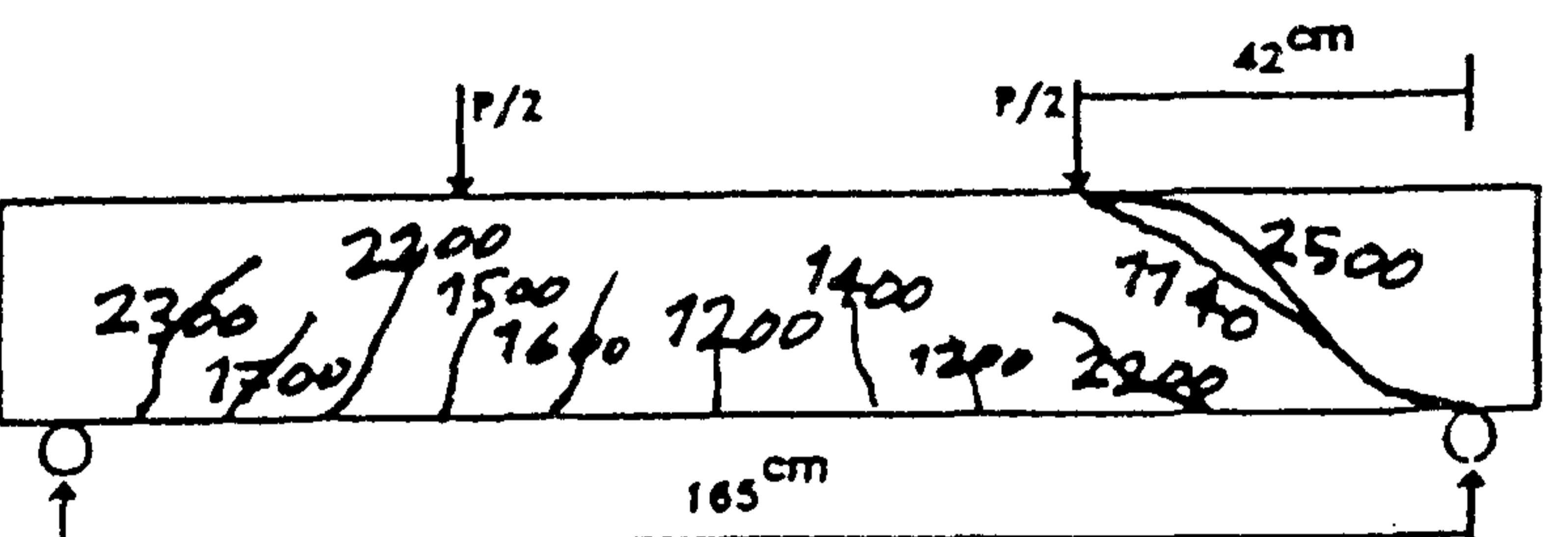
④



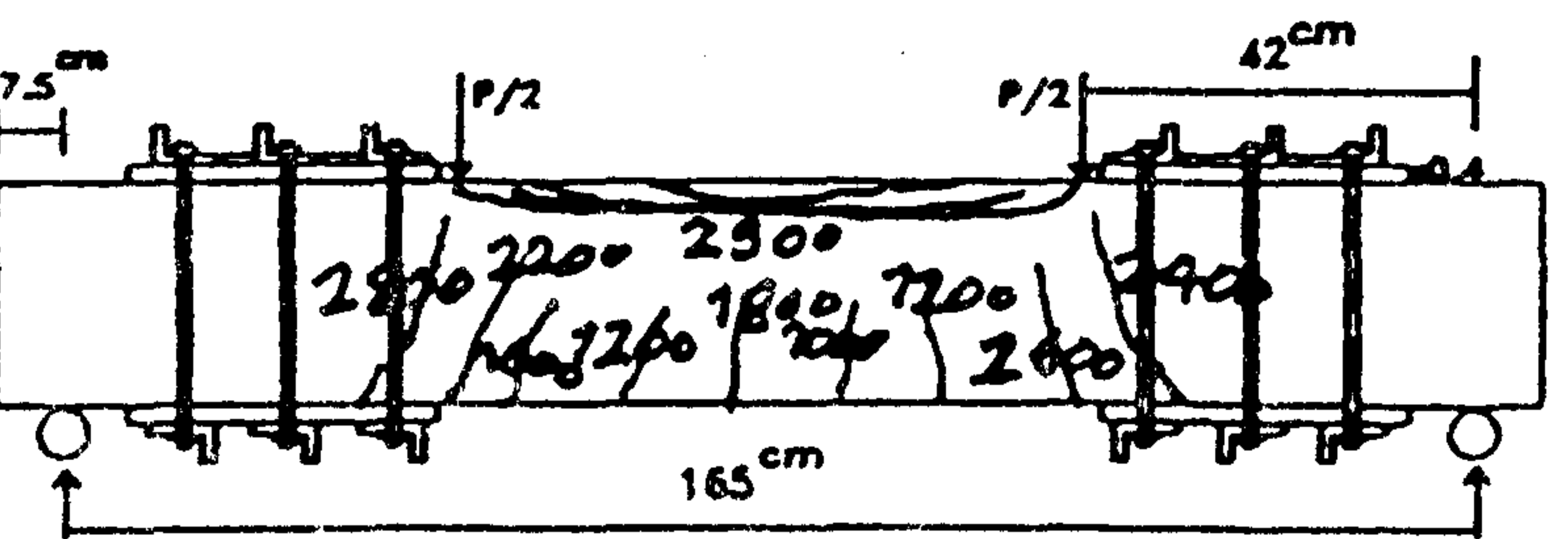
⑩



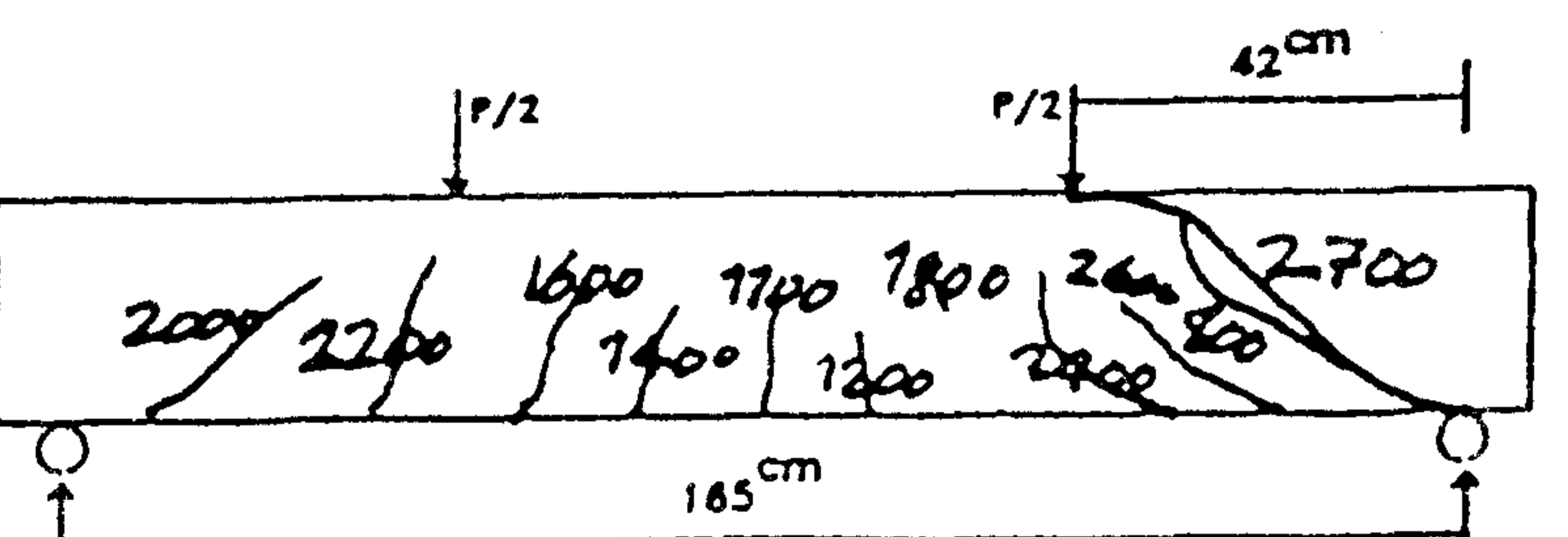
⑤



⑪

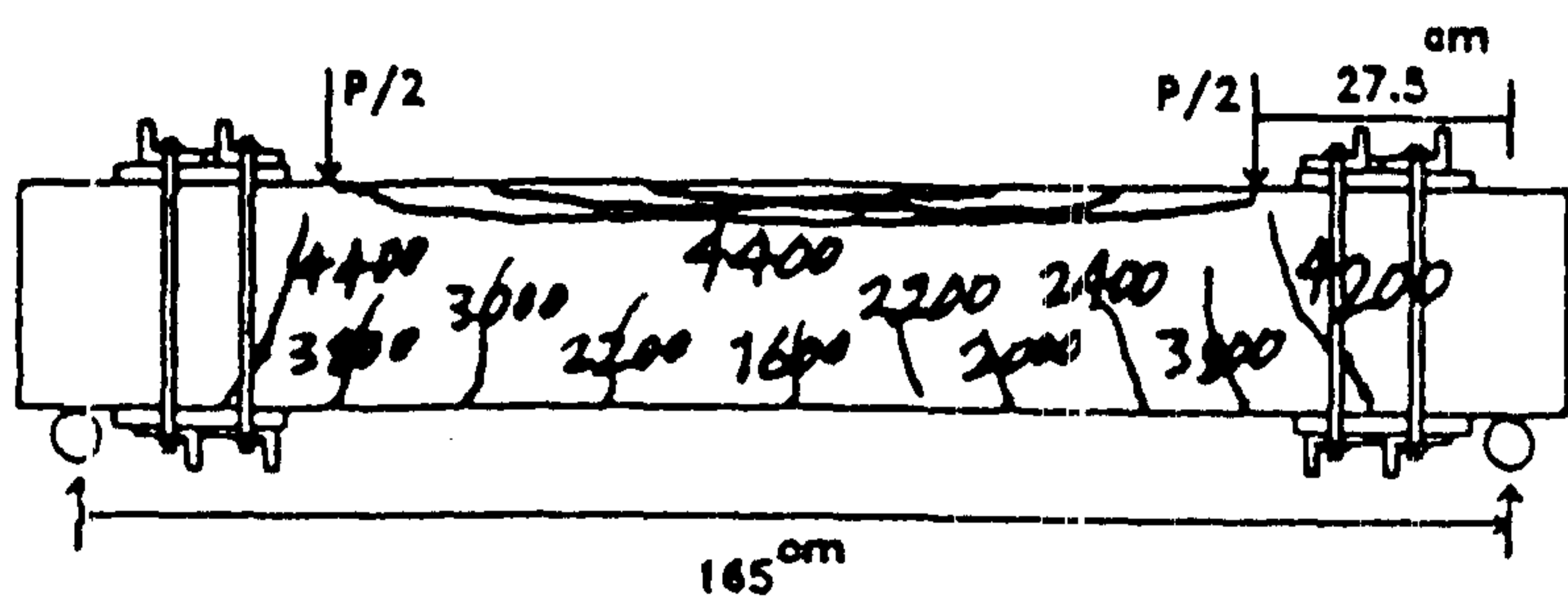


⑥

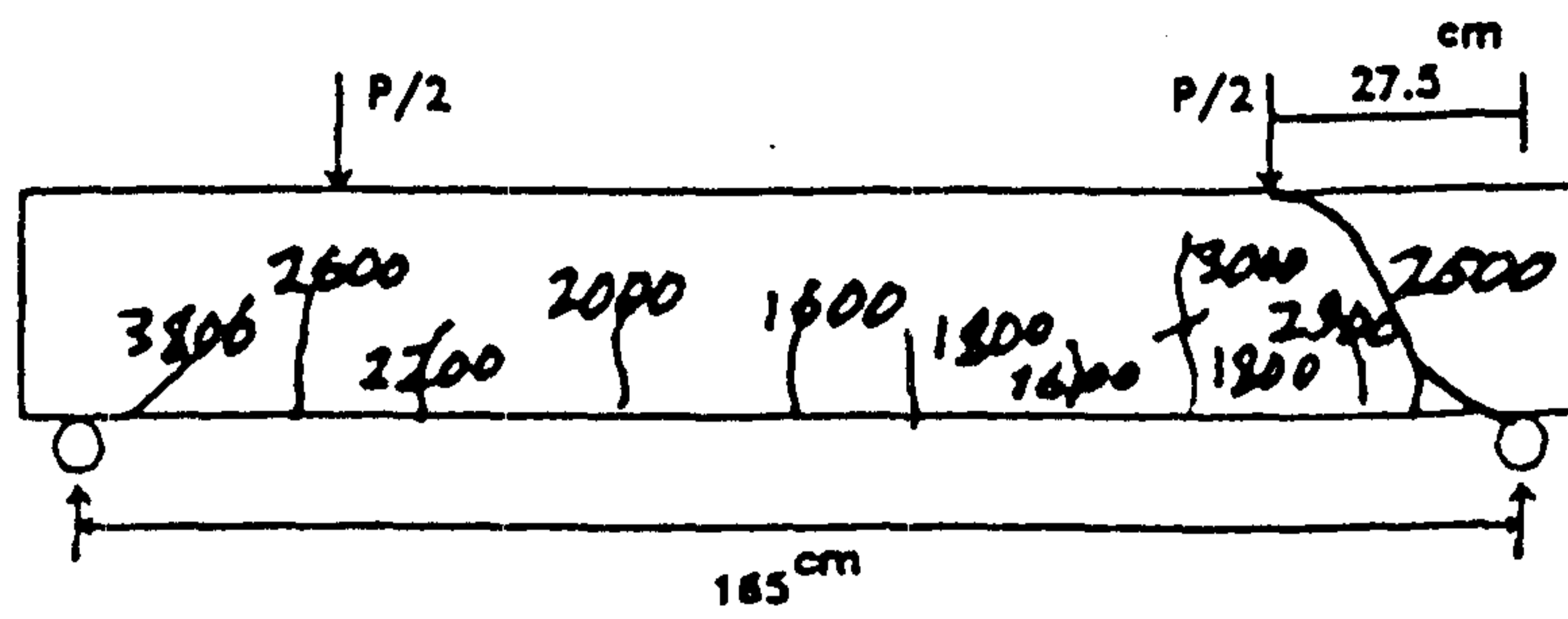


⑫

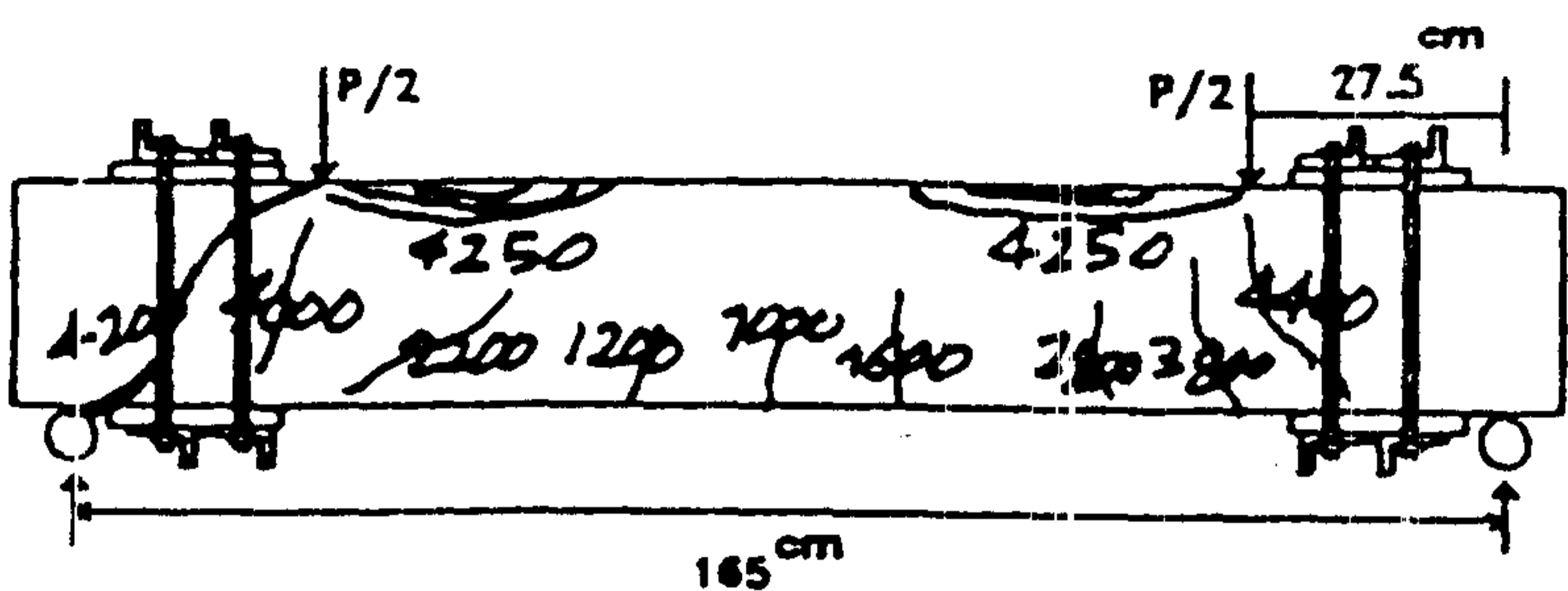
شکل ۹: نحوه شکست تیرهای آزمایش شده.



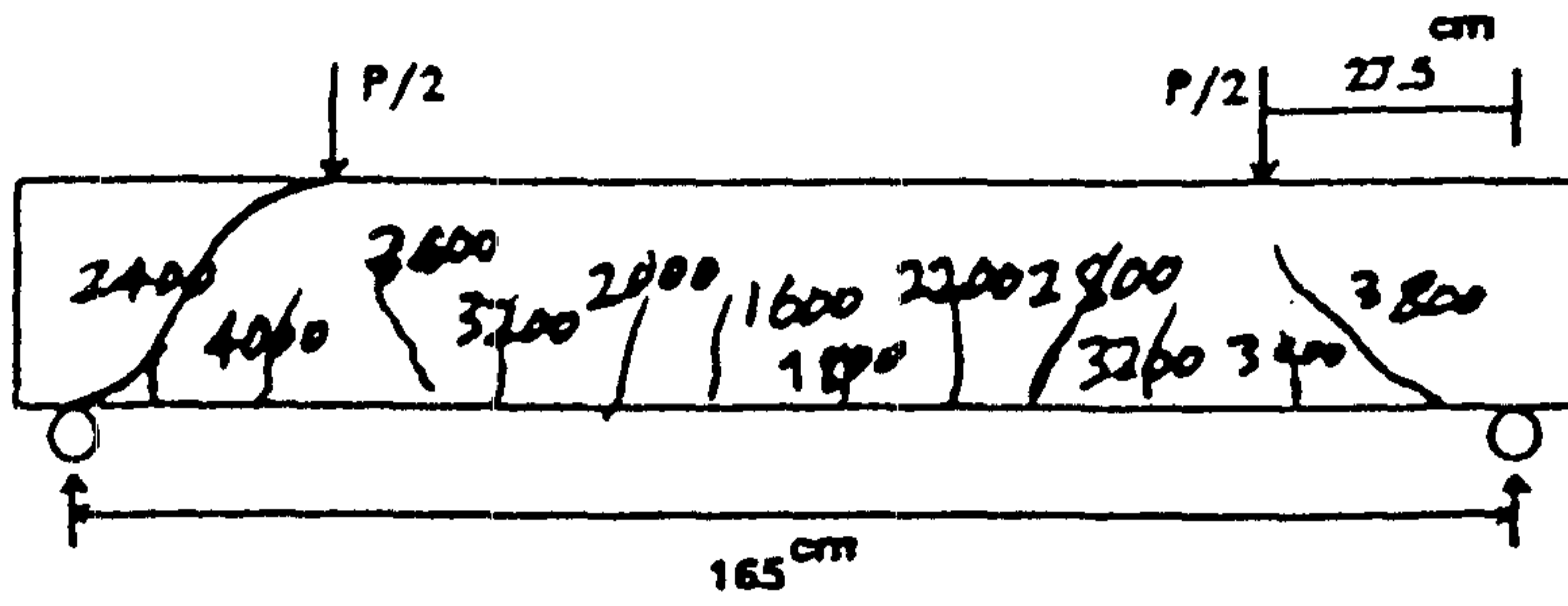
13



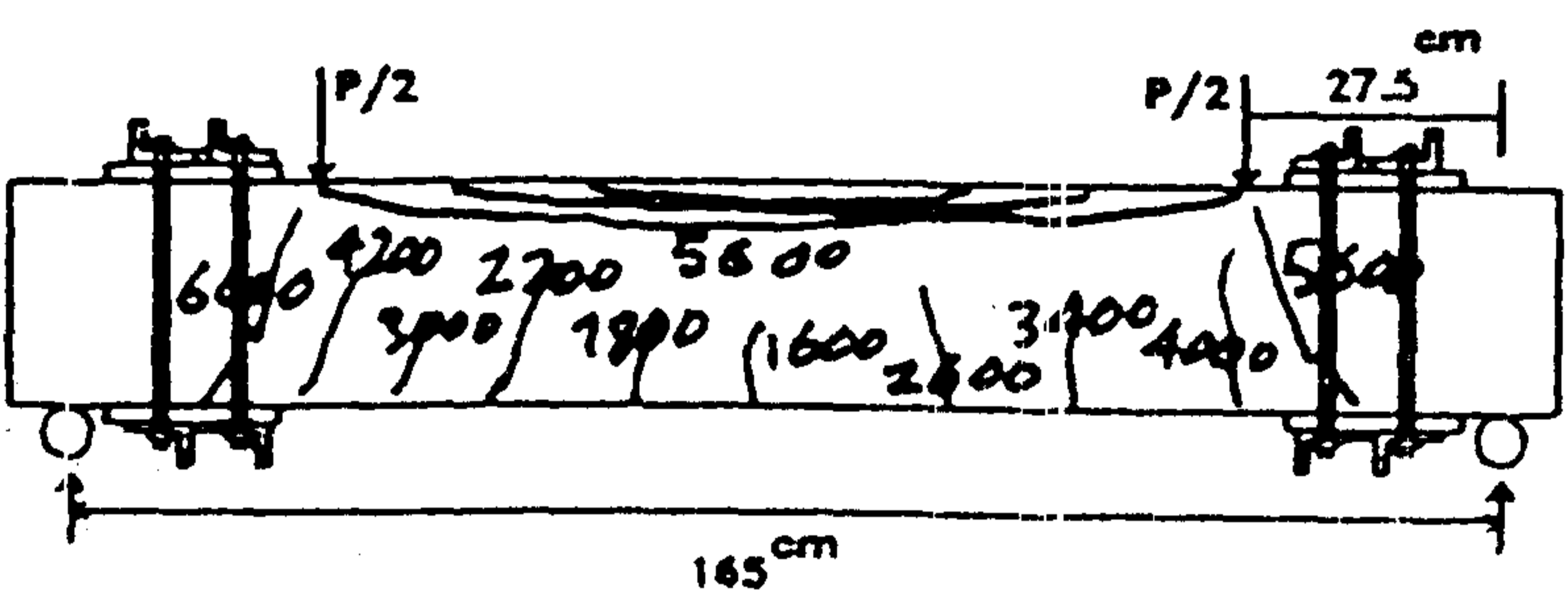
19



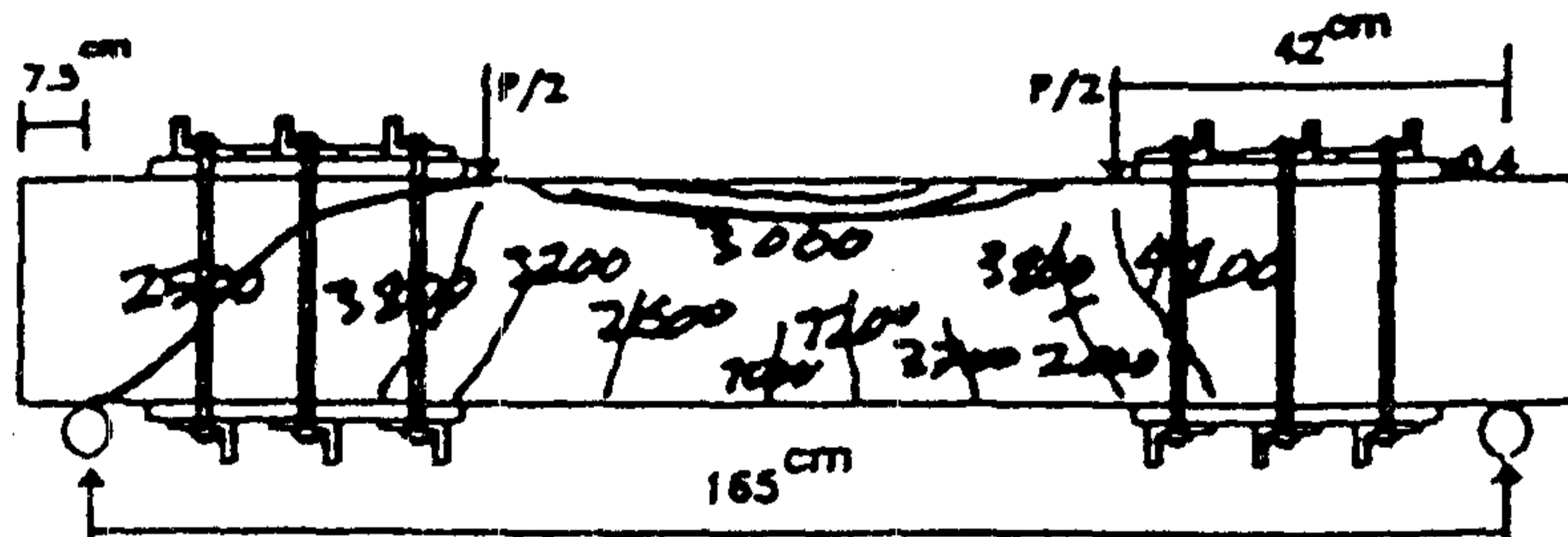
14



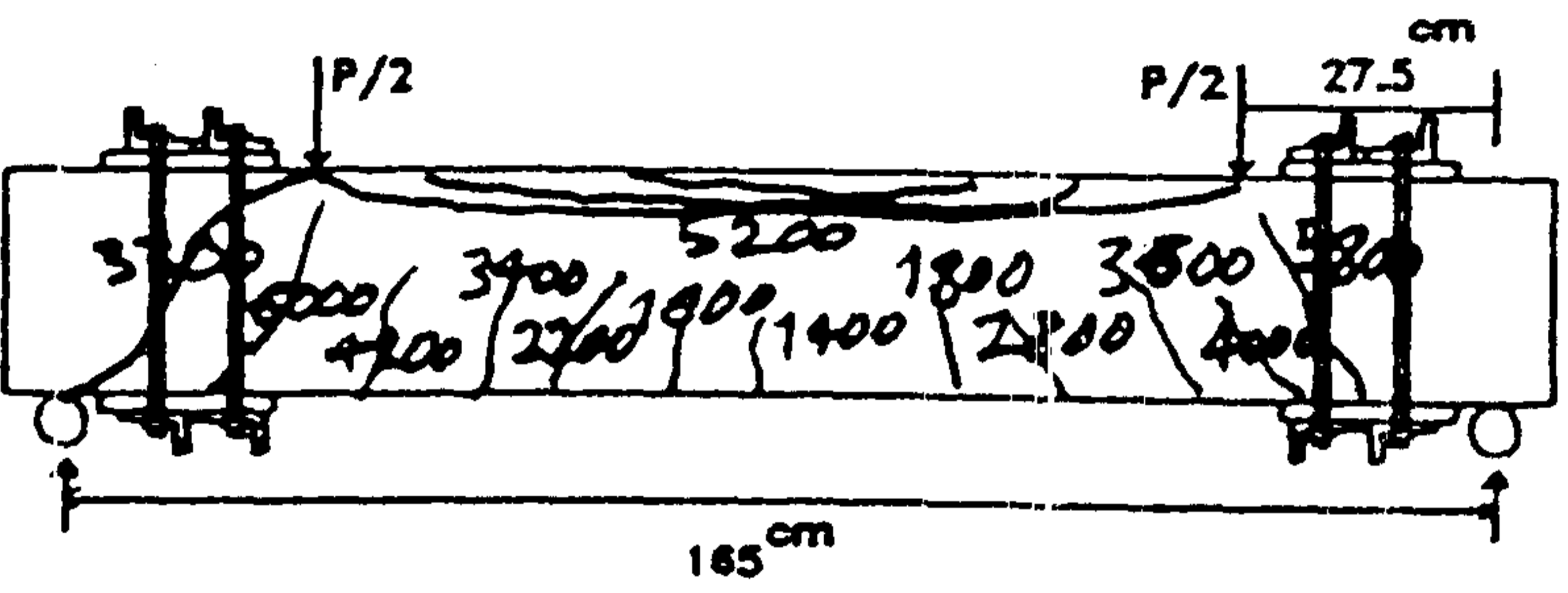
20



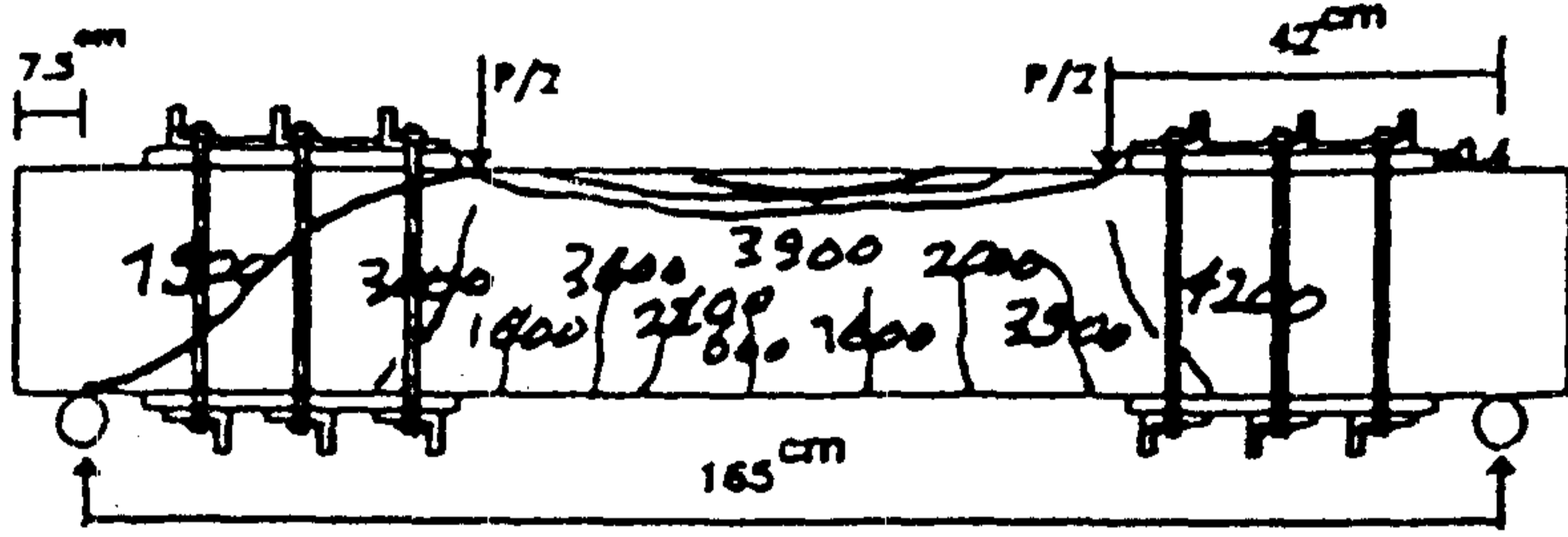
15



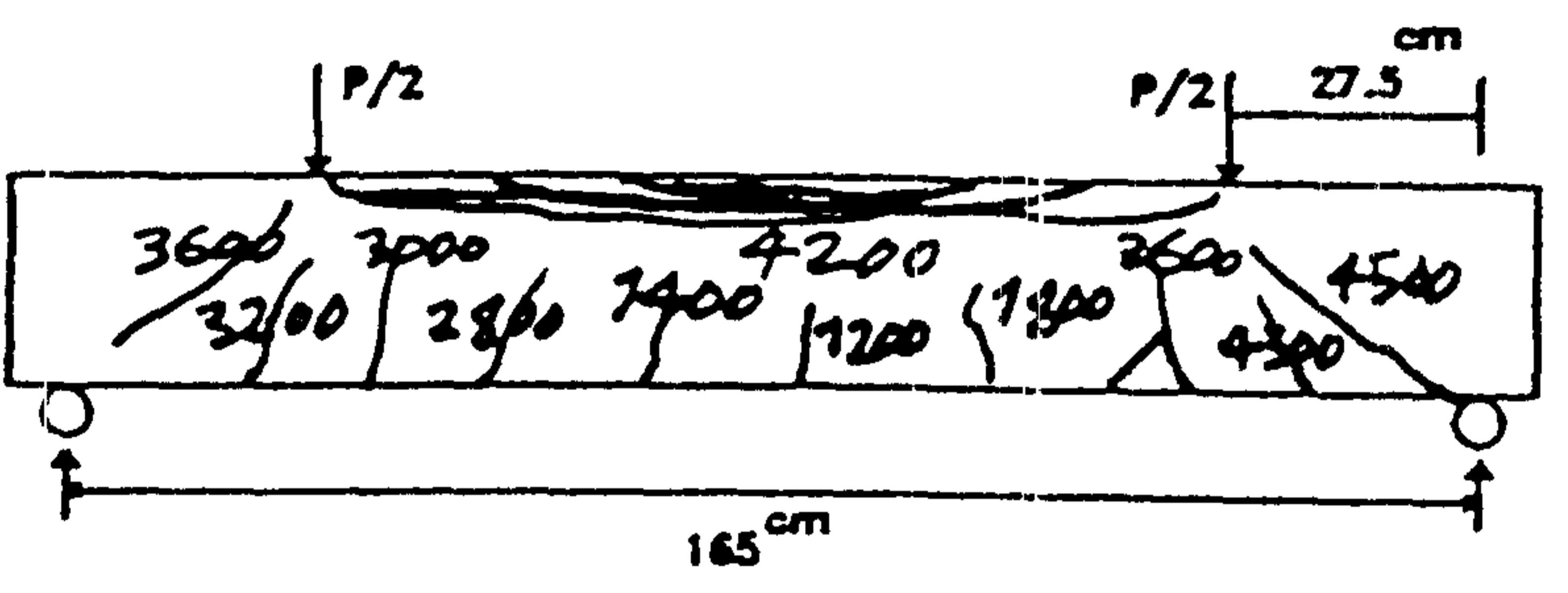
21



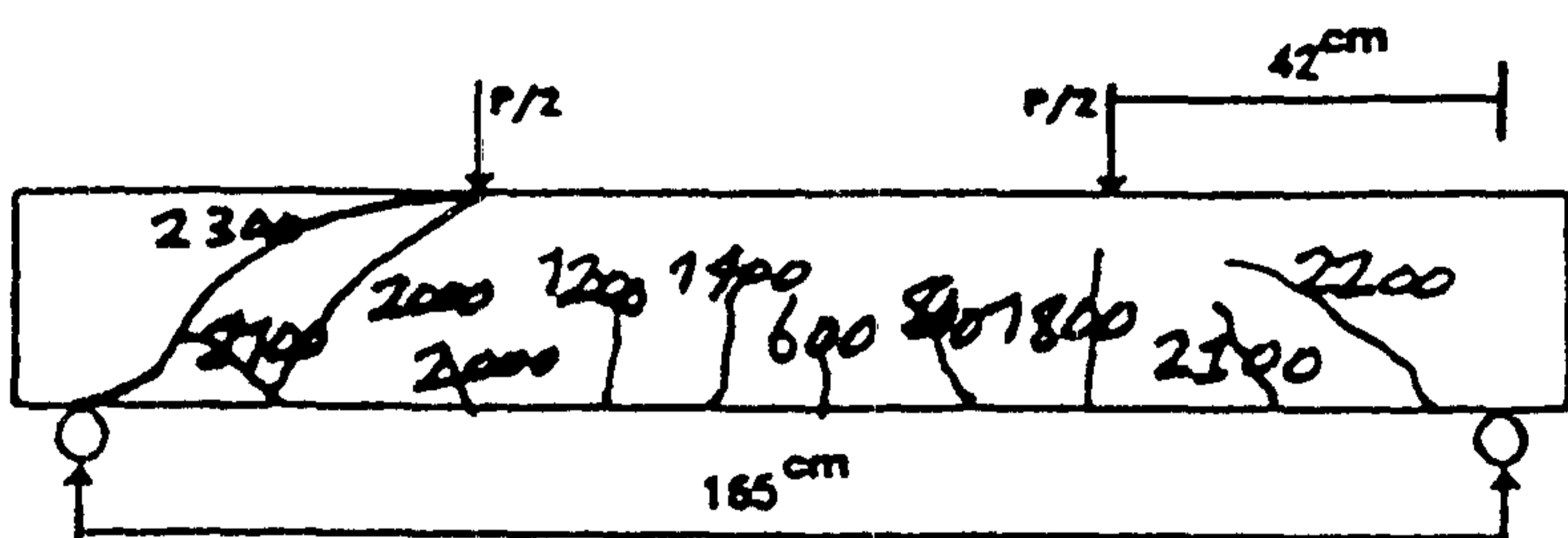
16



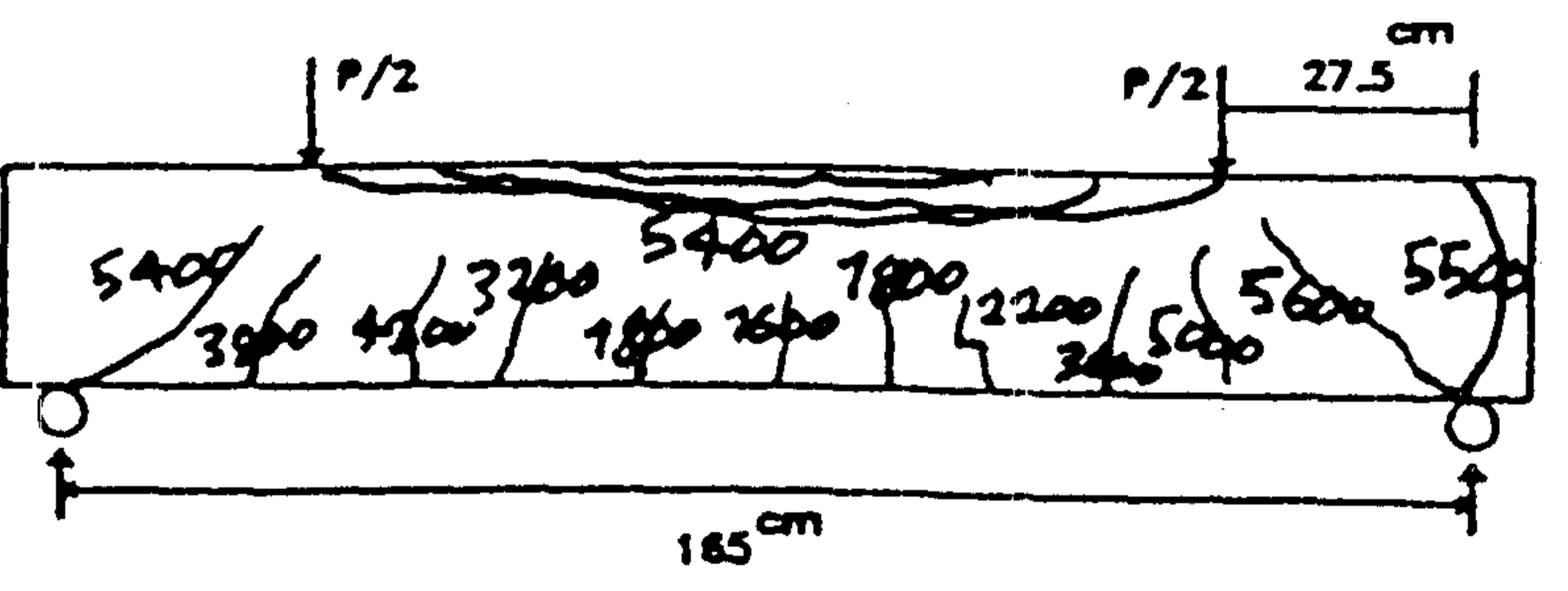
22



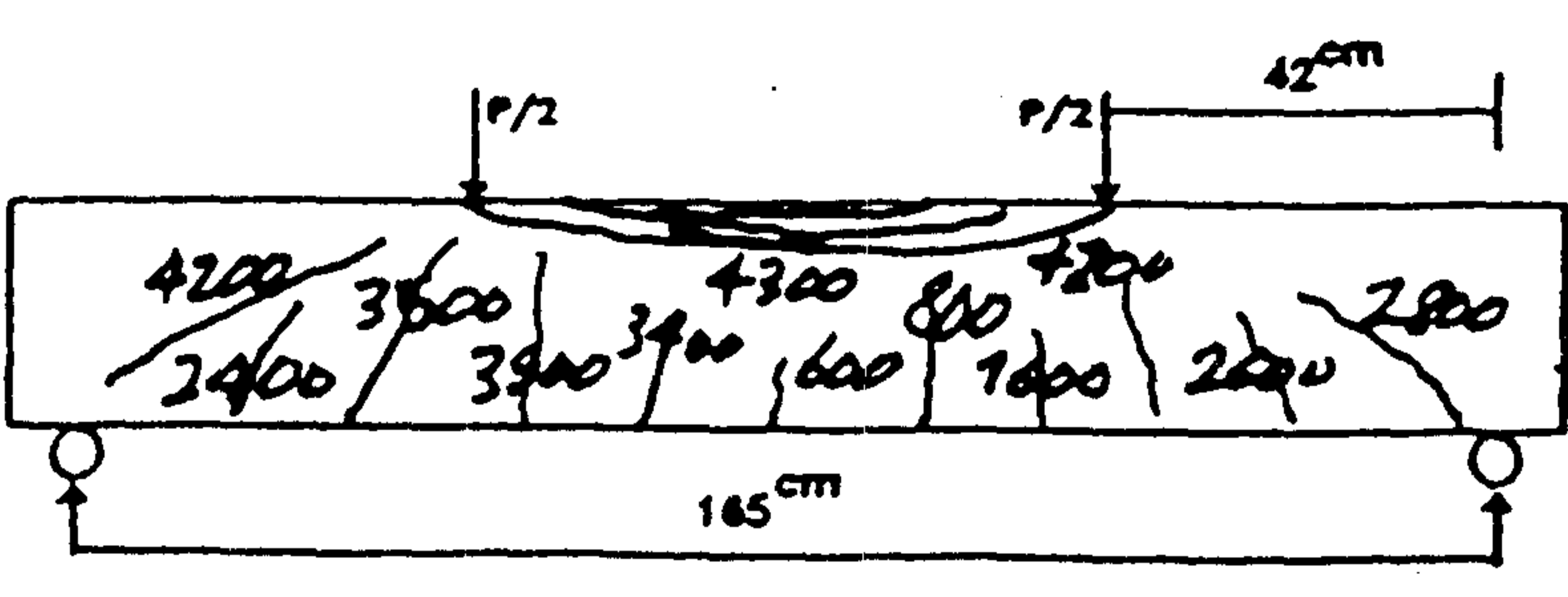
17



23



18



24

ادامه شکل ۹: نحوه شکست تیرهای آزمایش شده.

$\sigma_y = 14 \text{ kg/cm}^2$  و  $\sigma_x = 112/9 \text{ kg/cm}^2$   $\tau = 12/9 \text{ kg/cm}^2$  می باشد. مقادیر تنش های ماکزیمم و مینیمم به ترتیب

المان ۲ در این المان حالت تنش بصورت فشار-فشار-برش است که

است. مقدار نسبت بار شکست خمشی عملی تیرهای تقویت شده به بار مقاوم برای شکست برشی تئوریک در المان ۱ (روی تار خنثی) برای تیرهای با پارامترهای مختلف محاسبه شده که مستقل از مقدار نیروی پس فشردگی و مقاومت بتن بصورت زیر ارائه می‌گردد.

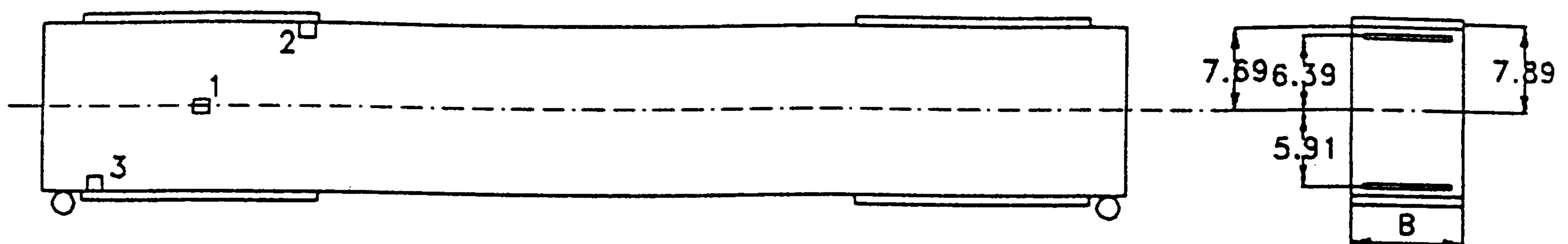
(a) برای  $\rho=0/0097$  و دهانه برشی  $a=\frac{L}{4}$  برابر  $0/42$  است.

(b) برای  $\rho=0/0145$  و دهانه برش  $a=\frac{L}{4}$  برابر  $0/55$  است.

(c) برای  $\rho=0/0097$  و دهانه برش  $a=\frac{L}{4}$  برابر  $0/56$  است.

(d) برای  $\rho=0/0145$  و دهانه برش  $a=\frac{L}{6}$  برابر  $0/85$  است.

چون بار متناظر با شکست برشی بسیار بزرگتر از بار شکست خمشی می‌باشد (بین  $1/2$  تا  $2/3$  برابر)، شکست برشی در تیرها با بکارگیری روش تقویت پس فشردگی (یا عبارتی دیگر محصور شدگی) اتفاق نمی‌افتد و شکست تیرها از نوع خمشی بوده که نتایج آزمایشگاهی نیز آنرا تأیید می‌کند.



شکل ۱۰: محل المانهای ارزیابی شده برای تعیین نوع شکست تیرها.

## نتیجه گیری

آرماتور کششی و یا دهانه برش کم، حداقل نیروی پس فشردگی برای جلوگیری از شکست برشی تیر بسیار کم بوده و حدود  $0/044'$  می‌باشد. همچنین با تقویت برشی تیرهای فاقد خاموت در ناحیه برش بحرانی بعلاوه ایجاد پدیده محصوریت، شکست از مود برشی به مود خمشی تغییر یافته و بار متناظر با شکست برشی بسته به مقادیر  $\rho$  و  $a$  حداقل  $1/2$  و حداکثر  $2/3$  برابر بار شکست خمشی تیر خواهد بود. بطور کلی از این روش تقویت با توجه به نتایج آزمایش و تئوری می‌توان در موارد کاربردی استفاده مؤثر و مطمئن، با توجه به تضمین شکست نرم در مود خمشی، بعمل آورد. همچنین چنانچه عضوی که تحت برش آسیب دیده باشد و عرض ترک برشی در آن به حدود بیش از  $10$  میلی‌متر نیز برسد، ناحیه برش با این روش قابل ترمیم و تقویت می‌باشد.

## قدردانی

کلید آزمایشهای مطروحه در این مقاله در آزمایشگاههای

$kg/cm^2$   $350 < kg/cm^2$  و  $114/5 < kg/cm^2$   $12/3$  می‌باشند که نتیجتاً شکست از المان ۲ آغاز نخواهد شد.

## المان ۳

در این المان تنشها شامل تنشهای فشاری  $14 kg/cm^2$ ، کششی  $31/7 kg/cm^2$  و برشی  $12/3 kg/cm^2$  می‌باشند. طبق تئوری ترک از این نقطه باید آغاز شود، هر چند در عمل چنین ترکی مشاهده نگردید. نیز شایان ذکر است که این ترک عملاً شکست خمشی نرم به همراه عملکرد آرماتورهای کششی طولی را نهایتاً بدنبال دارد.

لذا مشاهده می‌شود که شکست برشی در حضور پس فشردگی با مقدار پایین  $0/044'$  ایجاد نمی‌گردد.

براساس مقدار نیروی شکست عملی تیرها و با محاسبه مقدار تنش‌های اصلی المانها، عدم شکست برشی در تیرها تأیید گردیده

بطور کلی اثر پارامترهای مختلف در حضور نیروی پس فشردگی تقویت روی مقاومت و نرمی تیرها محسوس نبوده و تیرها با وجود کمبود قابل ملاحظه مقاومت برشی، پس از تقویت رفتار خمشی نرم از خود نشان داده‌اند. تقویت تیر با روش پس فشردگی باعث افزایش ظرفیت و مقاومت برشی و تا حدودی مقاومت خمشی تیر می‌گردد. تقویت تیرهایی که فاقد خاموت برشی می‌باشند باعث تغییر مود شکست از برش به خمش شده و ظرفیت خمش تیر را نیز افزایش می‌دهد. این افزایش در تیرهای با تقویت برشی بصورت نسبت مقاومت تیر تقویت شده به مقاومت تیر مبنا (با خاموت) به میزان صفر تا  $18$  درصد و نسبت به مقاومت تیر مبنا (بدون خاموت) به میزان  $12$  درصد تا  $96$  درصد می‌باشد.

با وجود پس فشردگی در منطقه برش بحرانی اثر کلیه پارامترها محدود بوده، با این وجود اثر پارامترهای  $\rho$  و  $a$  بیشتر از دیگر پارامتر روی مقاومت و نرمی تیرها بوده است. ارزیابی مود شکست تیرها براساس تئوری موهر نشان می‌دهد که برای مقادیر بالای

می‌آید. همچنین از حمایت‌های محدود شورای برنامه ملی تحقیقات کشور در انجام پروژه‌های تحت عنوان "تعمیر و بهسازی اعضای بتن مسلح واقع در مناطق لرزه‌خیز" که منجر به این مقاله شد قدردانی می‌شود.

دانشکده مهندسی عمران و مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف انجام شدند. از مدیر آزمایشگاه دانشکده مکانیک آقای دکتر حسینی تشکر می‌شود. بدینوسیله از تکنسین‌ها آقایان، چراغعلی، قنبری، بختیاری و ابراهیمی در انجام آزمایشها قدردانی بعمل

## مراجع

- 1 - Collins, F. and Roper H. (1990). "Laboratory investigation of shear repair of reinforced concrete beams loaded in flexure." *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 2, PP. 149-159.
- 2 - AL-Sulaimani, G. J., Sharif A., Basunbul, I. A., Baluch, M. H. and Ghaleb B. N. (1994). "Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 31, PP. 458-464.
- 3 - Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A. and Finch, W. W. (1995). "Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics." *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 3, PP. 295-303.
- 4 - Triantafillou, T. C. (1998). "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites." *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, PP. 107-115.
- 5 - ACI Committee 318. (1995). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95)*. American Concrete Institute, 369 P.
- ۶ - شمسانی، م. "بهسازی برشی تیرهای بتن مسلح در برابر زلزله." رساله کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی شریف، تابستان، ۲۸۸ صفحه، (۱۳۷۷).
- ۷ - امینی، ع. "مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی شکل‌پذیری اعضای خمشی تقویت شده در برابر برش." رساله کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی شریف، مهر، ۲۴۶ صفحه، (۱۳۷۷).
- 8 - *Handbook for mechanical engineers*. 9th Edition, McGraw-Hill Pub., 1989, 324 P.