طراحی سازه‌های مقاوم در برابر بار انفجار

مقدمه

بارهای انفجاری، مانند آن‌هایی که از انفجارهای تصادفی یا حملات عمدی ناشی می‌شوند، تهدیدی جدی برای ایمنی سازه‌ها و ساکنان آن‌ها به شمار می‌روند. این بارها می‌توانند به صورت امواج فشاری با شدت بالا ظاهر شوند که نیاز به طراحی‌های مهندسی خاص برای کاهش خسارات و حفاظت از جان و اموال دارند. این مقاله به بررسی اصول طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، انواع سازه‌های مقاوم، مواد مورد استفاده، استراتژی‌های طراحی، و روش‌های جلوگیری از فروپاشی پیشرونده می‌پردازد.

ویژگی‌های بار انفجاری

بار انفجاری معمولاً به صورت یک موج فشاری با سرعت بالا تعریف می‌شود که در مدت زمان بسیار کوتاهی (چند میلی‌ثانیه) به سازه وارد می‌شود. این بارها شامل:

فشار بیشینه: فشار اولیه ناشی از موج انفجار که به شدت به فاصله از منبع انفجار بستگی دارد.

فشار منعکس‌شده: فشاری که هنگام برخورد موج انفجار به سطح سازه ایجاد می‌شود و می‌تواند چندین برابر فشار اولیه باشد.

مدت زمان بارگذاری: زمان کوتاه اما بحرانی که موج انفجار به سازه اثر می‌کند.

این ویژگی‌ها ایجاب می‌کند که سازه‌ها با مواد مقاوم و طراحی‌های خاص ساخته شوند تا از خرابی موضعی و فروپاشی پیشرونده جلوگیری شود.

انواع سازه‌های مقاوم در برابر انفجار

سازه‌هایی که برای مقاومت در برابر انفجار طراحی می‌شوند، معمولاً در محیط‌های پرخطر مانند مناطق نظامی، صنعتی، یا دولتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع اصلی این سازه‌ها عبارتند از:

پناهگاه‌ها و ساختمان‌های نظامی: این سازه‌ها با دیوارهای بتنی تقویت‌شده و حداقل پنجره‌ها طراحی می‌شوند تا در برابر انفجارهای مستقیم مقاومت کنند. مثال‌هایی شامل پناهگاه‌های زیرزمینی و پایگاه‌های نظامی است.

ساختمان‌های صنعتی در مناطق پرخطر: مانند تأسیسات پتروشیمی و پالایشگاه‌ها که با دیوارهای فولادی ضخیم و طراحی ماژولار ساخته می‌شوند.

ساختمان‌های دولتی حساس: مانند سفارتخانه‌ها که با استانداردهای سختگیرانه برای محافظت در برابر حملات تروریستی طراحی می‌شوند.

سازه‌های زیرزمینی یا با دیوارهای خاکی: این سازه‌ها از خاک برای جذب انرژی انفجار استفاده می‌کنند و مقاومت بالایی دارند.

مواد مورد استفاده در طراحی مقاوم در برابر انفجار

مواد با مقاومت بالا و توانایی جذب انرژی کلیدی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار هستند. مواد رایج شامل:

بتن مسلح: با قدرت فشاری بالا و تقویت متقارن، برای دیوارها و ستون‌ها استفاده می‌شود.

بتن با عملکرد بالا (UHPC): با مقاومت فشاری تا ۲۰۰ مگاپاسکال و جذب انرژی بالا، برای پنل‌های پیش‌ساخته و دیوارهای حساس مناسب است.

فولاد: برای ستون‌های پرشده و قاب‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری بالا استفاده می‌شود.

مواد پیشرفته مانند DUCON: بتن تقویت‌شده با میکروفیبر که ضخامت کم و مقاومت بالایی در برابر انفجار دارد.

سامانه های سازه ای مناسب برای مقاومت در مقابل انفجار

بار ضربه ای انفجار به علت تاثیر بسیار کوتاه مدت آن بر سازه، برخلاف نیروهای زلزله، قادر به تحریک تمام جرم سازه نیست. بدین رو، در سازه های مقاوم در مقابل انفجار، افزایش جرم، تاثیر مثبت بر مقاومت سازه دارد. به همین علت، سازه های بتن مسلح بر سازه های سبک (مثل فولاد و چوب) ارجح هستند.

سازه بتنی: روش های ساده شده طراحی انفجاری سازه های بتن مسلح بر اساس پاسخ خمشی بوده و مشروط به حذف مودهای شکست ترد شکن می باشند. برای رسیدن به پاسخ شکل پذیر، جزئیات بندی مناسبی از میلگردها ضروری است. با افزایش تنش و کرنش در مقطعی از عضو، میلگردها به تسلیم می رسند و اجازه شکل گیری مفصل پلاستیک می دهند. بتن در این نواحی در سطح کششی دچار ترک شده و متعاقباً به حد کرنش فشرده شدن در

سطح فشاری می رسد. اگر دوران مفصل این نقطه افزایش یابد، بتن فشاری خرد و مقاومت خمشی آن از بین می رود.

ظرفیت دوران اضافی برای اعضای بتن مسلح را می توان با میلگردگذاری دو طرفه و خاموت بندی با فاصله کم ایجاد نمود. در این حالت در نواحی مفصل پلاستیک، لنگر مقاوم مقطع توسط زوج نیروی ایجادشده در میلگردهای مسلح کننده تامین می شود. استفاده از مقاطعی که به صورت یکطرفه، میلگردگذاری می شوند در طراحی انفجاری توصیه نمی شود.

جلوگیری از ایجاد مودهای شکست ترد با محدود کردن تنش های برشی بتن یا افزایش مقاومت بتن و یا افزایش ضخامت مقطع یا تنگ های محصور کننده برشی حاصل می شود.

مقدار میلگردهای خمشی نیز در یک عضو باید محدود شود تا عضو دچار گسیختگی ترد نشود. استفاده از تنگ با فاصله بندی مناسب جهت افزایش مقاومت و محصور کردن میلگرد خمشی و جلوگیری از کمانش میلگردها قابل توصیه است.

میلگردهای S500 و کمتر دارای شکل پذیری کافی برای بارگذاری دینامیکی می باشند. میلگردهای خاص با مقاومت تسلیم بالاتر ممکن است شکل پذیری مورد نیاز برای خم کاری را نداشته باشند.

وصله های جوشی و اتصالات بوشنی (مکانیکی) در صورت انطباق با مشخصات فنی می توانند به جای وصله های پوششی مورد استفاده قرار گیرند.

دیوارهای بتن مسلح، به عنوان دیوارهای محیطی و نما از اجزای مقاوم در برابر بارهای انفجاری شناخته می شوند.

سازه فولادی: مصالح فولادی تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی با نرخ کرنش بالا، قادرند پس از عبور از مرحله تسلیم، بدون اعمال تنش اضافی، تا رسیدن به مرحله سخت شدگی مجدد، حدود پانزده برابر کرنش حدتسلیم را تحمل کنند. این خاصیت برای مقابله با بارگذاری انفجاری بسیار مفید می باشد. یکی از مهم ترین مسائل در سازه های فولادی مقاوم در برابر انفجار، اتصالات آن ها می باشد که باید تا حدامکان به صورت شکل پذیر طراحی شوند. شکل پذیری اتصالات در سازه های فولادی معمولاً به صورت قابلیت چرخش اتصال تحت بارهای وارده تعریف م یشود. سازه ها یا اتصالات شکل پذیر می توانند با مقاومت استاتیکی نسبی کمتر، نیروی بیشتری را در هنگام اعمال بارهای دینامیکی و ضربه انفجار جذب نمایند.

هم چنین سازه های در معرض انفجار، واکنش های تکیه گاهی قابل توجهی دارند و این واکنش ها منجر به لزوم طراحی صفحه ستون به همراه میل مهارهای با ظرفیت بالا می شو د. هنگامی که مهارها به طور کامل و براساس اصول محاسباتی در بتن مهار شوند، سازوکار شکست آ ن ها از نوع شکست شکل پذیر و کششی است. ناکافی بودن فاصله از لبه های صفحات یا فاصله ناکافی بین پیچ ها باعث ایجاد ظرفیت کمتر لنگر خمشی و وقوع شکست ترد خواهد شد.

در روند تحلیل و طراحی انفجاری، اجازه تشکیل مفاصل پلاستیک در سراسر طول عضو داده می شود، بنابراین مقاطع باید به گونه ای باشند که در حین تشکیل این مفاصل، دچار کمانش موضعی نشوند و شرایط مقاطع فشرده لرز های را مطابق مبحث ۱۰ برآورده سازند.

موضوع مهمی که در طرح دینامیکی سازه های فولادی تحت اثر بارهای انفجاری مطرح می شود، احتمال معکوس شدن جهت تنش ها است. سازه های فولادی تحت اثر انفجار، در معرض تنش های معکوس نسبتاً بزرگی قرار می گیرند. تامین مهاربندی جانبی برای بال های مقاطع فشاری مهار نشده که قبل از معکوس شدن تنش ها در کشش بوده اند، از اهم موارد قابل توجه است که این مساله برای اعضایی که بارهای مرده سبکی را تحمل می کنند و یا اعضایی که در معرض فشارهای انفجاری کوتاه مدت قرار دارند، بحرانی تر است.

استراتژی‌های طراحی برای مقاومت در برابر انفجار

برای افزایش مقاومت سازه‌ها در برابر انفجار، استراتژی‌های زیر توصیه می‌شود:

افزایش فاصله ایمنی: افزایش فاصله بین منبع انفجار و سازه با استفاده از موانع بتنی یا خاکی.

جلوگیری از فروپاشی پیشرونده: طراحی سیستم‌های دوطرفه و تقویت اعضای کلیدی برای جلوگیری از خرابی زنجیره‌ای.

شکل و چیدمان بهینه: استفاده از اشکال دایره‌ای یا محدب برای کاهش فشار منعکس‌شده و اجتناب از گوشه‌های تیز که امواج انفجار را تقویت می‌کنند.

تقویت اجزای کلیدی: مانند ستون‌ها و تیرها با استفاده از بتن پرشده با فولاد یا تقویت‌کننده‌های کششی (۰.۵٪ تا ۲٪ سطح مقطع).

شیشه‌های مقاوم: استفاده از شیشه لمینت‌شده با لایه PVB 60 میلی‌متری برای کاهش خطر پرتاب قطعات.

مستهلک کننده های انرژی

استفاده مناسب از وسایل مکانیکی مانند میراگرها و جداسازها که باعث افزایش استهلاک انرژی و جداسازی سازه از پایه می شوند، برای سامانه های سازه ای مقاوم در مقابل انفجار ، قابل توصیه است.

جداسازها و میراگرها باعث بهبود رفتار کلی سامانه های سازه ای می شوند، لیکن تاثیر چندانی در جلوگیری از خرابی های موضعی که می توانند باعث گسیختگیهای پیش رونده شوند، ندارند. بنابراین، این وسایل کاربرد مناسبی در بهبود رفتار سامانه های سازه ای در مقابل انفجارهای حوزه دور دارند زیرا در این انفجارها بخش های وسیعی از سازه تحت تاثیر بارهای انفجاری قرار می گیرند و بار وارده باعث تحریک کل سازه می شود.

چالش اصلی در استفاده از جداسازها، امکان بروز تغییرشکل های بزرگ در پایه سازه (در هنگام بروز انفجارهای شدید) می باشد. این پدیده می تواند باعث خرابی جداسازها و همچنین برخورد ساختمان به دیوار یا سازه های هم جوار شده و ضربه ایجاد شده، می تواند باعث بروز خرابی های بیشتر شود.

بدین رو، باید دقت کافی در تامین ظرفیت تغییرشکل جداسازها صورت گیرد . در صورت فراهم نبودن فاصله لازم برای تامین ظرفیت تغییرشکل، می توان از تجهیزات کنترلی فعال و غیرفعال (کنش گر و واکنش گر) مناسب (علاوه بر جداسازها) استفاده نمود.

فروپاشی پیشرونده و روش‌های جلوگیری

فروپاشی پیشرونده به خرابی زنجیره‌ای یک سازه گفته می‌شود که با خرابی موضعی یک عضو کلیدی (مثل ستون یا تیر) شروع شده و به فروپاشی کل سازه یا بخش بزرگی از آن منجر می‌شود. این پدیده معمولاً به دلیل بارهای غیرعادی مانند انفجار یا ضربه رخ می‌دهد. برای جلوگیری از آن:

ظرفیت اضافی (Redundancy): طراحی مسیرهای بار جایگزین برای انتقال بار در صورت خرابی یک عضو.

اتصالات قوی: استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و مقاوم برای حفظ یکپارچگی سازه.

تقویت موضعی: افزایش مقاومت ستون‌ها و تیرها برای تحمل بارهای غیرمنتظره.

مثال واقعی فروپاشی پیشرونده، فرو ریختن برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی در سال ۲۰۰۱ است که خرابی موضعی ناشی از برخورد هواپیما و آتش‌سوزی به فروپاشی کل سازه منجر شد.

نقش شکل سازه در مقاومت در برابر انفجار

شکل و هندسه سازه نقش مهمی در کاهش اثرات انفجار دارد. اشکال دایره‌ای یا محدب به دلیل انحنای خود، امواج انفجار را منحرف می‌کنند و فشار منعکس‌شده را کاهش می‌دهند. در مقابل، گوشه‌های تیز یا پیش‌آمدگی‌ها می‌توانند امواج انفجار را متمرکز کرده و فشار موضعی را افزایش دهند. استانداردهایی مانند UFC 3-340-02 توصیه می‌کنند که از هندسه‌های ساده و سطوح صاف برای کاهش تمرکز فشار استفاده شود.

نتیجه‌گیری

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیازمند ترکیبی از مواد قوی، استراتژی‌های طراحی هوشمندانه، و توجه به هندسه سازه است. استفاده از بتن مسلح، UHPC، و فولاد، همراه با طراحی‌هایی که از فروپاشی پیشرونده جلوگیری می‌کنند، می‌تواند ایمنی سازه‌ها را به طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، شکل‌های دایره‌ای یا محدب و اجتناب از گوشه‌های تیز نقش کلیدی در کاهش فشار انفجار دارند. مهندسان باید از استانداردهایی مانند UFC 3-340-02 و ASCE برای طراحی بهینه استفاده کنند. در مبحث ۲۱ مقررات ملی نیز که با عنوان «پدافند غیرعامل» می باشد توصیه های بسیار خوبی برای مقاومت بهتر سازه و تاسیسات در برابر بارهای انفجار ارائه شده است.