بسم الله الرحمن الرحيم

٤٧٨٧١

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

بررسی رفتار لرزه‌ای گنبدهای فضاکار و عوامل مؤثر بر ضریب رفتار

نگارش: احمد حاجی سلطانی

۱۳۸۲ /۸/ ۲۰

استاد راهنما: دکتر شاهرخ مالک

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

مهندسی عمران گرایش سازه

شهریور ۱۳۸۲

۴۷۸۷۱

به نام خدا

دانشگاه تهران

دانشکده .....فنی.....

گروه آموزشی .....عمران.....

گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیات داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم : ..... احمد جامی سیلابی .....

در رشته : ..... عمران ..... گرایش : ..... سازه .....

با عنوان : ..... بررسی رفتار لوله های گندهای وضا کار و عوامل موثر بر ضریب رفتار .....

را در تاریخ : ..... ۱۳۸۲/۶/۲۵ .....

به عدد	به حروف
۱۸/۷۵	هجده و هفتاد و پنج صدم

با نمره نهایی:

و درجه | عالی | ارزیابی نمود.

ردیف	مشخصات هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما استاد راهنمای دوم (حسب مورد)	شارح مالک			
۲	استاد مشاور				
۳	استاد مدعو (یا استاد مشاور دوم)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
۴	استاد مدعو	[illegible]	[illegible]	آزاد اسلامی واحد تهران جنوب	
۵	نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی گروه آموزشی	[illegible]	[illegible]	فنی	

تذکر : این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در نخستین صفحه پایان نامه درج می گردد.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

چکیـــــده

استفاده روزافزون از سازه‌های فضاکار و مزایای بکارگیری اینگونه سازه‌ها برای پوشش دهانه‌های بزرگ، سبکی و رفتار مناسب در برابر زلزله‌های به وقوع پیوسته طراح را ناگزیر از شناخت رفتار دقیق این‌گونه سازه‌ها می‌کند، بخصوص آنکه آیین‌نامه جامعی برای این سازه‌ها ارائه نشده است.*

در پایان‌نامه حاضر تلاش شده است به بررسی خصوصیات دینامیکی گنبدهای فضاکار و همچنین مؤلفه شکل‌پذیری از ضریب رفتار این گونه سازه‌ها پرداخته شود. در عین حال سعی شده است تا اثرات کمانش اعضای سازه نیز در این خصوصیات ملحوظ گردد. به این منظور ابتدا یک مدل برای به حساب آوردن کمانش اعضا معرفی گردید و سپس سازه فضاکار گنبدی دولایه با فرم شوئدلر تحت اثر زلزله‌های ال‌سنترو، منجیل و طبس با بیشینه شتابهای متفاوت قرار گرفت و نتایج تحلیلها که به دو صورت خطی و غیرخطی انجام گرفته است با هم مقایسه گردید. زلزله ال‌سنترو نیز به دو صورت تک‌مؤلفه‌ای و سه‌مؤلفه‌ای به سازه اعمال گردید و اثرات بررسی سه‌مؤلفه‌ای این سازه مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر این به منظور تعیین ظرفیت نهایی و همچنین ضریب شکل‌پذیری این سازه نتایج تحلیل تک‌آهنگ در حالات غیرخطی با در نظر گرفتن کمانش اعضا و همچنین حالت رفتارغیرخطی بدون در نظر گرفتن اثرات کمانشی اعضا مورد بررسی قرار گرفت و مقادیری برای ضریب شکل‌پذیری که یکی از مؤلفه‌های مهم مؤثر در ضریب رفتار این گونه سازه‌ها است ارائه گردید

---

* یادآوری این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در حال حاضر آیین‌نامه سازه‌های فضاکار برای نخستین بار در سطح بین‌المللی در دانشکده فنی با همکاری اساتید و متخصصان ایرانی در دست تدوین است.

تقدیر و تشکر

اکنون که با یاری خداوند متعال، نگارش این پایان‌نامه به پایان رسیده است بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر مالک که در طول انجام این تحقیق از نظرات و راهنمایی‌های ارزنده ایشان استفاده کردم تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از دانشجویان محترم، آقایان سید مجید دعایی اسکویی و مهدی احمدی‌زاده که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند تشکر می‌نمایم و آرزوی موفقیت‌های بیشتری در تمام شوؤن برای تمامی این عزیزان از خداوند مسألت دارم.

فهرست مطالب

۱ فصل اول : مقدمه ۱
۱-۱-گسترش استفاده از سازه‌های فضاکار ۱
۱-۲-تعریف «سازه فضاکار» ۳
۱-۳-تاریخچه توسعه گنبدها ۴
۱-۴- انواع مختلف گنبدهای فضاکار ۶
۱-۵- پیونده‌ها در سازه‌های فضاکار ۱۰
۱-۶- هدف از انجام پروژه حاضر ۱۲
۲ فصل دوم : مروری بر تحقیقات گذشته ۱۵
۲-۱- معرفی ۱۵
۲-۲- مفاهیم عمومی تحلیل کمانشی ۱۶
۲-۳- عواملی که بر نیروی کمانش تأثیر میگذارد ۲۱
۳ فصل سوم : گزارش‌هایی از اثرات زلزله بر سازه‌های فضاکار ۲۹
۴ فصل چهارم : بررسی رفتار تک عضو ۳۲
۴-۱- روش‌های مختلف آنالیز کمانشی سازه‌های فضاکار ۳۲
۴-۱-۱- روش خطوط گسیختگی ۳۲
۴-۱-۲- جایگزینی عضو کمانه کرده ۳۳
۴-۱-۳- اصلاح سختی عضو کمانه کرده ۳۴
۴-۱-۴- روش‌های المان محدود ۳۵
۴-۲- غیرخطی مصالح و هندسی ۳۶
۴-۳- بررسی کمانش تک عضو ۳۸
۵ فصل پنجم : تحلیل تاریخچه زمانی ۴۹
۵-۱- معرفی مدل ۴۹
۵-۲- رکوردهای زلزله ۵۱
۵-۳- بررسی و تحلیل نتایج تاریخچه زمانی ۵۶
۶ فصل ششم : آنالیز Pushover و بررسی شکل‌پذیری ۷۳
۶-۱- مقدمه ۷۳
۶-۲- مفهوم ضریب رفتار ۷۳
۶-۳- پاسخ نیرو- تغییرمکان سازه ۷۶
۶-۳-۱- ارزیابی آزمایشگاهی روابط نیرو- تغییرمکان ۷۹
۶-۴- مؤلفه‌های اساسی R ۷۹

۶-۴-۱- ضریب مقاومت ۸۱
۶-۴-۲- ضریب شکل‌پذیری ۸۲
۶-۴-۳- ضریب نامعینی ۸۴
۶-۴-۴- ضریب میرایی ۸۵
۶-۵- تحلیل پوش‌اور ۸۶
۶-۵-۱-آنالیز مدال ۸۷
۶-۵-۲- مدهای بالاتر ۹۳
۷ فصل هفتم : جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۹
۸ مراجع ۱۰۲
۹ پیوست الف: نمودار تاریخچه زمانی نیروی برش پایه، نیروی محوری برخی اعضا و تغییرمکان نقاط منتخب ۱۰۴

فهرست جداول

جدول ۴-۱- مقایسه مقدار تئوری و اجزاء محدود ۴۱
جدول ۵-۱- مشخصات زلزله‌های مورد استفاده..... ۵۲
جدول ۵-۲- تعداد اعضای کمانش کرده در زلزله ال‌سنترو ۶۴
جدول ۵-۳- تعداد اعضای کمانش کرده در زلزله طبس..... ۶۴
جدول ۵-۴- تعداد اعضای کمانش کرده در زلزله منجیل ۶۵
جدول ۵-۵- اختلاف نسبی پاسخ‌های اعضا بین دو تحلیل..... ۶۶
جدول ۵-۶- میانگین (برای تمام اعضا) اختلاف بین نتایج تحلیل‌های مختلف برحسب درصد ۶۹
جدول ۶-۱- مقادیر تجربی ضریب کاهش برای قابهای فولادی ۷۹
جدول ۶-۲- مشخصات مدهای غالب درسازه ۸۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- نمونه‌ای از گنبد با فرم شوئدلر ۹
شکل ۱-۲- نمونه‌ای از گنبد با فرم Ribbed ۹
شکل ۱-۳- نمونه‌ای از گنبد با فرم لاملا ۹
شکل ۱-۴- نمونه‌ای از سیستم پیونده گویسان ۱۱
شکل ۱-۵- جزییات پیونده KK یا مرو(MERO) ۱۲
شکل ۲-۱- نمودار نیروی محوری برحسب لاغری عضو ۱۷
شکل ۲-۲- روش Koiter ۱۸
شکل ۲-۳- تأثیر غیرخطی در تحلیل ۲۰
شکل ۲-۴- ناپایداری عضو ۲۱
شکل ۲-۵- (الف) ناپایداری گرهی، (ب) ناپایداری پیچشی گره ۲۲
شکل ۲-۶- ناپایداری خطی ۲۳
شکل ۲-۷- ناپایداری کلی ۲۴
شکل ۲-۸- ناپایداری کوپله ۲۴
شکل ۴-۱- مدل رفتاری اعضا در روش حذف عضو کمانه کرده ۳۳
شکل ۴-۲- مدل رفتاری اعضا در روش اصلاح سختی عضو کمانه کرده ۳۵
شکل ۴-۳- انواع مدل‌های سخت‌شوندگی مصالح ۳۷
شکل ۴-۴- اثر بوشینگر ۳۷
شکل ۴-۵- منحنی تنش- کرنش فولاد ۳۸
شکل ۴-۶- مقایسه بین یک، دو و سه المان ۱۸۹ ..... ۴۱
شکل ۴-۷- سه مدل مقایسه شده ۴۲
شکل ۴-۸- سه مدل مقایسه شده، لاغری ۴۶ ..... ۴۴
شکل ۴-۹- سه مدل مقایسه شده، لاغری ۶۹ ..... ۴۵
شکل ۴-۱۰- سه مدل مقایسه شده، لاغری ۱۱۹ ..... ۴۶
شکل ۴-۱۱- سه مدل مقایسه شده، لاغری ۱۴۱ ..... ۴۷
شکل ۴-۱۲- سه مدل مقایسه شده، لاغری ۱۹۹ ..... ۴۸
شکل ۵-۱- مدل گنبد شوئدلر دولایه ۵۰
شکل ۵-۲- مؤلفه‌های طولی، عرضی وقائم زلزله ال‌سنترو ۵۳
شکل ۵-۳- مؤلفه‌های طولی، عرضی وقائم زلزله طبس ۵۴
شکل ۵-۴- مؤلفه‌های طولی، عرضی وقائم زلزله منجیل ۵۵
شکل ۵-۵- نمودار وضعیت کمانش اعضا ۵۹
شکل ۵-۶- نمودار وضعیت تسلیم اعضا ۶۰
شکل ۵-۷- مجموع عکس‌العمل افقی تکیه‌گاهی سازه(برش پایه) در زلزله Elcen 0.75g ۶۱

شکل ۵-۸- نیروی محوری عضو ۱۲۳ در زلزله Elcen 0.75g ۶۱
شکل ۵-۹- نیروی محوری عضو ۱۳۷۵ در زلزله Tabas 0.5g ۶۲
شکل ۵-۱۰- نیروی محوری عضو ۷۵۰ در زلزله Tabas 0.5g ۶۳
شکل ۵-۱۱- مقایسه اختلاف نسبی نتایج تحلیل تک‌مؤلفه‌ای و سه‌مؤلفه‌ای در حالات خطی و غیرخطی .. ۶۷
شکل ۵-۱۲- مقایسه اختلاف نسبی نتایج تحلیل‌های‌خطی و غیرخطی در شدت‌های متفاوت زلزله ال‌سنترو تک‌مؤلفه‌ای ۶۸
شکل ۵-۱۳- مقایسه اختلاف نسبی خطی و غیرخطی در شدت‌های متفاوت زلزله ال‌سنترو..... ۶۸
شکل ۵-۱۴- نیروی محوری عضو ۱۷۵۰ در زلزله Manjil 0.75g ۷۱
شکل ۵-۱۵- تغییرمکان نقطه یک در جهت X ۷۱
شکل ۵-۱۶- شکل تغییر شکل‌یافته سازه در زلزله Manjil 0.75g در لحظه ناپایداری ۷۲
شکل ۶-۱- استفاده از ضریب R برای تبدیل طیف پاسخ الاستیک به طیف طراحی ۷۶
شکل ۶-۲- نمودار تغییرمکان یک سازه دلخواه ۷۶
شکل ۶-۳- روش پاولی و پریستلی ۷۷
شکل ۶-۴- روش انرژی معادل ۷۸
شکل ۶-۵- ارزیابی عملی ضرایب مقاومت وشکل‌پذیری ۸۰
شکل ۶-۶- مقدار تجمعی جرم مدی ۸۸
شکل ۶-۷- اشکال مدهای اصلی سازه ۸۹
شکل ۶-۸- نمودار V-δ برای مود اول در سازه Beam..... ۹۰
شکل ۶-۹- نمودار V-δ برای مود اول در سازه Link..... ۹۱
شکل ۶-۱۰- روش انرژی معادل برای سازه Beam ۹۲
شکل ۶-۱۱- روش انرژی معادل برای سازه Link..... ۹۲
شکل ۶-۱۲- اشکال تغییرشکل‌یافته تحلیل تک‌آهنگ مد اول و نمودار نیروی محوری برخی اعضای کمانش کرده..... ۹۳
شکل ۶-۱۳- نمودارهای تحلیل تک‌آهنگ برای مودهای مختلف سازه با المان Link..... ۹۵
شکل ۶-۱۴- نمودارهای تحلیل تک‌آهنگ برای مودهای مختلف سازه با المان Beam..... ۹۶
شکل ۶-۱۵- اشکال تغییرشکل‌یافته تحلیل تک‌آهنگ(مد پانزدهم) و نمودار نیروی محوری برخی اعضای کمانش کرده ۹۷
شکل ۶-۱۶- اشکال تغییرشکل‌یافته تحلیل تک‌آهنگ (مد سی‌ویکم) ۹۷
شکل ۶-۱۷- اشکال تغییرشکل‌یافته تحلیل تک‌آهنگ (مد هفتاد وهفتم) ونمودار نیروی محوری برخی اعضای کمانش کرده..... ۹۸

۱ فصل اول : مقدمه

۱-۱-گسترش استفاده از سازه‌های فضاکار

گسترش سازه‌های فضاکار به طور تحسین‌برانگیزی در سراسر دنیا ساخته و بکار برده می‌شوند. از اینگونه سازه‌ها برای پوشش استادیوم‌های ورزشی، مراکز تفریحی و فرهنگی، ایستگاههای راه‌آهن، آشیانه‌های هواپیما، سازه‌هایی که برای استفاده در خارج از زمین بکار میروند، نمایشگاهها، فروشگاهها و سالنهای بزرگ چند منظوره استفاده می‌شود. مهمترین ویژگی این‌گونه سازه‌ها دهانه بزرگ آنها است که علاوه بر رفع نیازهای عملکردی باعث زیبایی و ابهت آنها می‌گردد.

گرایش به ساخت این گونه سازه‌ها و گسترش آن، پس از استفاده وسیع مهندسان از بتن برای ساخت اشکال متنوع هندسی آغاز شد. آراستگی و زیبایی پوسته‌های بتنی معماران را مجذوب خود ساخت. شکل‌پذیری بتن این امکان را فراهم می‌ساخت که آنرا به هر شکل دلخواهی در آورند. استفاده گسترده از بتن که از قرن نوزدهم میلادی شروع شد مهندسین را با مشکلات استفاده از آن آشنا کرد. این مشکلات عبارتند از:

۱- زمان زیاد مورد نیاز برای ساخت

۲- مشکلات قالب‌بندی و گران بودن آن

۳- سنگینی بتن.

ازطرفی مهندسان دریافتند که ساخت بسیاری از اشکال پیچیده با سازه‌های فضاکار بسیار اقتصادی‌تر از استفاده از بتن خواهد بود. بلدین ترتیب از دهه ششم قرن نوزدهم توجه سازنده‌ها به سوی سازه‌های فضاکار جلب شد و امروزه تقریباً در سراسر دنیا اینگونه سازه‌ها ساخته می‌شوند. شاید ذکر این نکته جالب توجه باشد که اولین مهندسی که امکان استفاده از سازه‌های شبکه‌ای را در ساختمانها به شکل امروزی نشان داد مخترع معروف الکساندرگراهام‌بل بود.

از دید مهندسی سبکی همراه با سختی سازه‌های فضاکار از جمله امتیازات آنها محسوب می‌شود. صلبیت آنها باعث می‌شود که این گونه سازه‌ها نسبت به سازه‌های معمولی کمتر به جابجایی محل تکیه‌گاهها حساس باشند. این گونه سازه‌ها حتی تحت بارگذاری نامتقارن دارای توزیع تنش نسبتاً یکنواختی هستند که این مطلب به دلیل پخش تنش چند جهتی در سازه‌های فضاکار است. تجارب علمی نشان می‌دهند که این گونه سازه‌ها حتی تحت آسیب‌های شدید به طور ناگهانی واژگون نمی‌شوند.

در زیر به طور خلاصه به دلایل گسترش استفاده از سازه‌های فضاکار و پیشرفت آنها در نیم قرن اخیر اشاره می‌شود :

۱- توانایی بیشتر مهندسین سازه در تحلیل و طراحی سازه‌ها با تعداد درجات آزادی زیاد و دسترسی به رایانه‌های قوی

۲- پیشرفت صنعت جوشکاری و ریخته‌گری و آهنگری (ساخت پیوندهایی که قادرند تعداد زیادی هموند را در زوایای مختلف در فضای سه بعدی به یکدیگر متصل کنند.) وجود واحدهای تکرار شونده در بعضی الگوهای سازه فضاکار امکان ساخت صنعتی آن را نیز افزایش می‌دهد.[۶]

۳- دستیابی به ماشین‌آلات پیشرفته که ساخت قطعات در کارخانه، حمل ونقل قطعات و برپایی سازه را ممکن می‌سازد

۴- تنوع در مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت مانند فولاد، آلومینیوم، چوب، پلاستیک،شیشه و یا ترکیبی از آنها

۵- نیاز روزافزون به اماکن بزرگ سرپوشیده مانند نمایشگاهها، ورزشگاهها و...

۶- تحولات جدید معماری و گرایش آن به سازه‌هایی که به شکل فضاکار ساخته میشوند

۷- ایجاد امکان ساخت دهانه‌های بزرگ بدون پایه‌های میانی و ایجاد آزادی عمل برای آرشیتکت

۸- سهولت نسبی تعمیر و تقویت پس از زلزله

۱-۲-تعریف «سازه فضاکار»

در مهندسی سازه برخی از سازه‌ها با تقریب مناسبی به صورت دو بعدی تحلیل و طراحی می‌شوند. در سازه‌های دو بعدی یا صفحه‌ای، بارگذاری خارجی و نیروهای داخلی سازه در یک صفحه قرار دارند. این صفحه شامل خود سازه (به شکل ایده‌آلی) قبل و بعد از بارگذاری نیز می‌باشد.

در مقابل سازه فضاکار سازه‌ای است که در آن ترکیب هندسه سازه، بارگذاری خارجی، نیروهای داخلی و جابجایی‌های سازه فراتر از یک صفحه هستند. به این ترتیب واژه «سازه فضاکار» به یک سیستم سازه‌ای سه‌بعدی اطلاق می‌گردد و این واژه در مقابل واژه «سازه دوبعدی یا صفحه‌ای» است. در کنار تعریف فوق که یک تعریف کمی و رسمی از سازه فضاکار است، در بسیاری از مراجع منظور از این واژه تنها گروه خاصی از سازه‌های سه بعدی است. این سازه‌ها عبارتند از :

- شبکه‌ها
- چلیکها
- گنبدها
- برجها و دکلها
- شبکه‌های کابلی
- سیستم‌های غشایی
- سازه‌های تاشو
- سازه‌های کش‌بست

مرکز اطلاعات مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

در پژوهش حاضر گنبدهای فضاکار مورد بررسی قرار گرفته‌اند که جزء سازه‌های فضاکار اسکلتی[1] است.از ویژگیهای سازه‌ها فضاکار اسکلتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اثر رفتاری هیچیک ازسه بعد در جذب نیروهای اعمالی قابل صرفنظر کردن نیست
- متشکل از اعضای خطی (خرپا، تیر، تیرستون) است. به عبارت دیگر سیستم سازه پیوسته نبوده و از نوع اسکلتی باشد.
- به عنوان قاعده کلّی شامل تعداد قابل توجهی از مدول‌های ساده و تکرار شونده باشد.
- با استفاده از قابلیت باربری در سه بعد امکان کاهش وزن فراهم می‌آید. لذا سازه‌های فضاکار اسکلتی معمولاً سبک ولی صلب می‌باشند.[۱]

۱-۳-تاریخچه توسعه گنبدها

دهانه‌های بزرگ همواره مورد توجه معماران و مهندسان بوده است. گنبدها روشی ساده و مقرون به صرفه اقتصادی را برای پوشش دهانه‌های بزرگ فراهم می‌کنند و بوسیله طراحانی که مزایا و زیبایی قابل توجه این سازه‌ها را می دانند مورد استفاده قرار می‌گیرد. احتمالاًاولین استفاده از گنبدها به سالهای ۷۰۵-۶۸۱ قبل از میلاد بر میگردد که خرابه‌های بدست آمده از آن نشان میدهد که تعدادی از ساختمانها با یک گنبد نیم‌دایره‌ای پوشیده شده بوده اند.

توسعه گنبدها رابطه تنگاتنگی با توسعه مصالح در دسترس دارد. در عصر باستان، گنبدها بیشتر از سنگ ساخته می شدند که به تدریج جای خود را به مصالح آجری دادند. چوب ماده اصلی مورد استفاده برای پوشش گنبدها در قرون وسطی بود. حتی بعضی از سازه‌های چوبی آن زمان، تا به حال نیز وجود دارند که اکثریت آنها در آلمان، فرانسه، ایتالیا، روسیه و اسکاندیناوی وجود دارند.

دهانه‌های بزرگ که میتوانند بوسیله گنبد پوشیده شوند همواره ذهن معماران را به خود مشغول کرده است. در قرن نوزدهم چندین ساختمان نمایشگاهی بزرگ بوسیله گنبد پوشانیده شد.عامل قطعی در این تمایل معرفی آهن به عنوان یکی از مصالح جدید بود که

---

۱. Skeletal Space Structures