Archive of SID

نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۳، مهر ماه ۱۳۸۹، از صفحه ۴۳۷ تا ۴۴۵

بررسی تجربی اثرات میزان سفت‌شدگی پیچ‌های پیونده‌های گوی‌سان بر صلبیت شبکه دو لایه فضاکار

سیروس غلامپور[۱]، شاهرخ مالک[*۲] ، محسن غفوری آشتیانی[۳] و جواد واثقی امیری[۴]

[۱]دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات

[۲]دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

[۳]استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[۴]عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی - بابل

(تاریخ دریافت ۸۵/۷/۵ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۸/۳ ، تاریخ تصویب ۸۷/۱۲/۱۰)

چکیده

مروری بر تحقیقات انجام‌شده در زمینه اتصالات سازه‌های فضاکار نشان می‌دهد که نقش میزان سفت‌شدگی پیچ‌های اتصالات این سازه‌ها در رفتار و عملکرد سازه کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است . در این مقاله اثرات این میزان سفت‌شدگی را بر صلبیت سازه به طور تجربی مورد مطالعه قرار داده و آزمایش‌های متعددی روی شبکه‌های دو لایه فضاکار ساخته‌شده با سیستم MERO و با ابعاد 10m×10m انجام شده است . این شبکه‌ها با میزان سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌های اتصال نصب شده و تحت بار متمرکز وارده بر گره میانی بالایی قرار داده شده‌اند . پاسخ کلی سازه به شکل تغییر مکان گره‌های زیرین آن ثبت شده است . نتایج آزمایش‌ها مؤید تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر صلبیت سازه بوده‌اند که در این مقاله ضمن تشریح و تفسیر این تأثیرها، توصیه‌هایی برای ارتقای کیفی طراحی و اجرای این گونه سازه‌ها از نظر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در چارچوب روش‌های طراحی مبتنی بر آزمایش ارائه شده است.

واژه های کلیدی: سازه فضاکار، سیستم اتصالی MERO، میزان سفت‌شدگی پیچ، صلبیت سازه

مقدمه

بر اساس مطالعات انجام‌شده، مشخصات سیستم اتصالی و مکانیزم واقعی عملکرد اتصالات سازه‌های فضاکار در پاسخ و رفتار کلی سازه بسیار مؤثر است. در سال ۱۹۸۲ Schmidt و همکاران[۱] و در سال ۱۹۸۹، Fathelbab و Mc Connel [۲] و همچنین در سال ۱۹۹۲ Murakami [۳] ضمن مطالعات تحلیلی و تجربی، بر نقش قابل توجه مشخصات سیستم اتصال بر رفتار سازه‌های فضاکار تأکید کردند. در سال۱۹۹۴ KitiPornchai و همکاران[۴] بر اساس مطالعات نظری انجام‌شده بر سازه‌های مشبک نتیجه گرفتند که لغزش پیچ‌ها ممکن است تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر میزان خیز سازه‌های مشبک داشته باشد، اما بر مقاومت نهایی این سازه‌ها اثر قابل توجهی ندارد.

در سال ۱۹۹۷ چناقلو[۵] ضمن بررسی تجربی و تحلیلی اثر انعطاف‌پذیری یا نیمه صلبیت اتصالات در رفتار سازه‌های فضاکار، عدم قطعیت‌های مرتبط با اتصالات و تأثیرات آن را بر عملکرد سازه فضاکار مورد بحث قرار داد.

در سال ۱۹۹۹ مالک[۶] نتایج آزمایش‌هایی با بارگذاری تک‌محوری و دومحوری بر پیونده‌های گوی سان نیامی ارائه داد که اطلاعات رفتاری جدیدی در زمینه انعطاف‌پذیری این نوع از پیونده‌ها در اختیار قرار داده است.

در سال ۲۰۰۰، Yamada و همکاران[۷] ضمن مطالعه انتقال تنش ناشی از خمش در اجزای اتصال سازه‌های فضاکار دریافتند که صلبیت خمشی و مقاومت اتصال تحت تأثیر اندازه و ابعاد بخش انتهایی، پیچ و غلاف بوده و بر حسب نیروی محوری و لنگر خمشی نیز تغییر نمایند.

در سال ۲۰۰۲ واثقی و بیگی[۸] نقش میزان گیرداری در مقایسه با اتصالات مفصلی کامل، پیشنهادهایی را برای تعدیل و اصلاح نتایج تحلیل با در نظر گرفتن این آثار ارائه کردند تا با نتایج آزمایش موردی گزارش شده توسط سایر محققان تطابق یابد.

* نویسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۸۶۸ ، فاکس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ ، Email: maalek@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

در سال ۲۰۰۴، Fulop و Ivanyi [۹] با انجام آزمایش‌هایی بر یک سازه فضاکار تا مرحله خرابی، اثر رفتار نیمه صلب اتصالات پیچی را در مورد نمونه آزمایش مزبور بررسی کردند.

اتصالات در مقایسه با دیگر اجزای تشکیل‌دهنده سازه، پیچیدگی‌های هندسی و مکانیکی بیشتری داشته است. بنابراین نبود قطعیت‌ها در رفتار اتصالات به مراتب از دیگر المان‌های سازه‌ای قابل ملاحظه‌تر هستند. پیچیدگی هندسی، وجود خواص متفاوت برای مصالح مختلف به کار رفته در اتصال، وجود سطوح تماس و نبود پیوستگی‌ها، اثرات اندرکنش نیروها و لنگرها، رواداری‌ها در ساخت و نصب و خطاهای انسانی در حین ساخت و برپایی سازه مهم‌ترین دلایل نبود قطعیت در رفتار اتصالات هستند. در سازه‌های فضاکار، پیوندها و اتصالات معرف منطق طرح و ساخت هستند و علاوه بر جنبه‌های تأثیرات سازه‌ای، بر عوامل مؤثر بر اقتصاد طرح و ساخت، دیدگاه‌های زیباشناختی و جنبه‌های متنوع دیگری اثرات حائز اهمیتی را در بر می‌گیرند.

یکی از مهم‌ترین منابع و دلایل نبود قطعیت در رفتار اتصالات در پیوندهای گویسان سازه‌های فضاکار، میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها به شرحی است که توضیح داده خواهد شد. تفاوت در مقادیر طول درگیر پیچ‌ها با رزوه‌ها، نبود فضای مناسب برای جاگیری ابزار برای سفت‌کردن بعضی از پیچ‌ها، اثرات میزان سفت‌شدگی یک پیچ بر میزان سفت‌شدگی پیچ‌های دیگر و خطاهای انسانی و رواداری‌های اجرایی از عواملی هستند که دست به دست هم داده، سبب می‌شوند تا میزان سفت‌شدگی واقعی پیچ‌ها در سازه‌های فضاکار از کارگاه به کارگاه و حتی از گره سازه به گره دیگر متفاوت باشند . اصولاً در اتصال MERO به دلیل ماهیت اتصال و وجود پیچ‌ها و غلاف‌ها، نوع ناپیوستگی بین اجزای اتصال، قطعی و اجتناب ناپذیر بوده و به دلیل وجود شکاف‌ها و پیش‌تنیدگی‌ها و نیز انتقال فشار به وسیله غلاف و انتقال کشش به وسیله پیچ، مکانیزم انتقال بار در این نوع اتصال پیچیده است. چون میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر میزان فاصله بین اجزای اتصال یا میزان تنش‌های تماسی ناشی از پیش‌تنیدگی اتصال مؤثر است و با توجه به آنکه در مرجع [۵] احتمال مؤثر بودن میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار اتصال و در نتیجه بر رفتار کلی سازه مطرح شده است، در مطالعات حاضر این موضوع به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده شده است. لازم به یادآوری است که در مرجع[۵] به طور مستقیم مطالعه‌ای در این زمینه به عمل نیامده است. به طور کلی مطالعه اثرات میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار سازه‌های فضاکار با سیستم اتصالی MERO که در کشور ما و در سطح جهانی، طی نیم قرن گذشته بیشترین کاربرد را داشته است، می‌تواند با دو رویکرد متفاوت انجام گیرد:

- بررسی اتصالات ایزوله شده و منظور داشتن مشخصه‌های رفتاری اتصالات در مدل تحلیلی سازه به منظور بررسی رفتار سازه‌ها.
- بررسی مستقیم اثرات رفتاری اتصالات بر سازه‌ها.

در رویکرد اول، اتصال به خودی خود تحت مطالعه قرار گرفته و با استفاده از آزمایش بر پیوندهای مجزا، رفتار مجموعه پیوند و اتصال تحت تأثیر ترکیبات متفاوت بارگذاری چندمحوری مورد بررسی قرار می‌گیرد و به دنبال آن مدل سازه با در نظر گرفتن مدل رفتاری پیوندها تهیه و تحلیل می‌شود[۱]و [۶].

در رویکرد دوم که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است، رفتار سازه به طور مستقیم از راه آزمایش مورد مطالعه و تحقیق قرار می‌گیرد.

چون از طرفی مطالعه اثرات میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر رفتار یک سازه موضوعی پیچیده است و انتظار نمی‌رود با استفاده از یک رویکرد فقط تئوریک به نتایج قابل اعتمادی بیانجامد و از طرفی دیگر مدل‌های با مقیاس‌های کوچک از یک سازه فضاکار نیز نمی‌توانند رفتار چنین سازه‌هایی را در موقعیت واقعی بهره‌برداری آن با دقت کافی ارائه کنند. بنابراین در این تحقیق برای دستیابی به درکی دقیق‌تر از تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر صلبیت سازه‌های فضاکار، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر شبکه دولایه واقعی با پیوندهای گویسان MERO با میزان سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌ها به عمل آمده است و به دنبال آن، این نتایج تجربی با نتایج تحلیل الاستیک اینگونه سازه‌ها به روش‌های متداول مقایسه شده است.

شبکه‌های دو لایه آزمایش

مطالعات تجربی موردنظر بر مدل آزمایشی احداث شده به صورت شبکه دولایه با دهانه 10m×10m در دو

www.SID.ir

Archive of SID

حالت هم‌بندی اعضاء (بافتار) انجام شده است. نمای کلی شبکه دو لایه مورد آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. مطالعه تجربی مورد نظر بر دو مدل شبکه با ابعاد کلی یکسان انجام شده است که چهار تکیه‌گاه در چهار گوشه لایه پایینی دارند. فاصله مرکز به مرکز بین لایه‌های بالا و پایین یک متر است. بنابراین زوایای عضوهای جان با افق ۴۵ درجه بوده و فاصله مرکز تا مرکز پیوندهها در امتداد اعضاء جان برابر ۱۴۱ سانتی‌متر است.

شبکه مدل (۱) از ۳۹۲ عضو شامل ۸۴ عضو در لایه بالایی، ۱۱۲ عضو در لایه زیرین و ۱۹۶ عضو جان و نیز ۱۱۳ پیونده گویسان تشکیل شده است. ابعاد کلی شبکه مدل (۲) مانند مدل (۱) است، اما این شبکه با حذف ۴ گره در لایه زیرین که منجر به حذف ۱۶ عضو جان و ۱۶ عضو لایه زیرین شده ایجاد شده است. بنابراین مدل (۲) از ۳۶۰ عضو، شامل ۸۴ عضو در لایه بالایی، ۹۶ عضو در لایه زیرین و ۱۸۰ عضو جان و ۱۰۹ پیونده گویسان تشکیل شده است.

این آزمایش‌ها در دانشکده فنی دانشگاه مازندران به انجام رسیده است. لازم به یادآوری است که همزمان با انجام مطالعات حاضر، دو مطالعه دیگر نیز بر همین مدل‌های آزمایش در جریان بوده است. در یکی از این مطالعات[۱۰] هدف از مطالعه تجربی بررسی اثر میزان سفت‌شدگی پیچ‌های اتصال بر خواص میرایی سازه و در مطالعه دیگر، میزان سفت‌شدگی یکسان برای همه اتصالات در نظر گرفته شده و تعداد تکیه‌گاه‌ها در پیرامون سازه متفاوت اختیار شده‌اند و اثر ترکیبی شرایط تکیه‌گاهی و میزان سفت‌شدگی پیوندهها مورد بررسی تجربی قرار داده شده است[۱۱].

شکل ۱: یک نمای کلی از شبکه دو لایه مورد آزمایش.

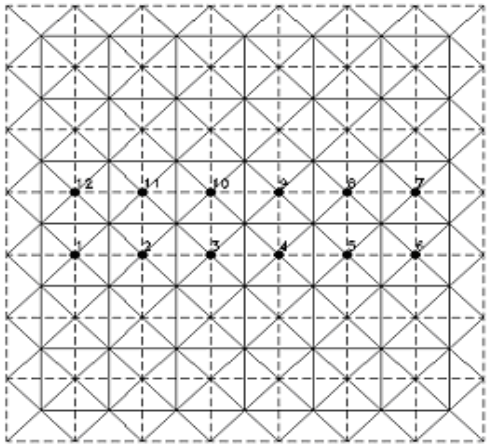
شرح آزمایش

شبکه‌های مدل (۱) و (۲) هر یک تحت تأثیر بار متمرکز وارده بر گره بالایی میانی قرار داده شده و بار وارده به تدریج افزوده شده و در هر مرحله تغییرمکان ۱۲ گره زیرین اندازه‌گیری و ثبت شده است. با توجه به هندسه کاملاً متقارن شبکه‌ها، با مراجعه به شکل (۲) انتظار می‌رود که در حالت ایده‌آل تغییرمکان گره‌های گروه (الف) شامل گره‌های ۱، ۶، ۷ و ۱۲ و همچنین گروه (ب) شامل گره‌های۲، ۵، ۸ و ۱۱ و بالاخره گروه (ج) شامل گره‌های ۳، ۴، ۹ و۱۰ یکسان باشند. اما با توجه به منابع گوناگون نبود قطعیت که در مشخصات فنی و ابعاد هندسی و نیز خطاهای اجرا و اندازه‌گیری وجود دارد، مقادیر تغییر مکان ثبت‌شده به طور دقیق یکسان نخواهند بود. در این آزمایش ها برای بالا بردن دقت نتایج، ضمن مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و کنترل میزان دقت اندازه‌گیری‌ها، از مقادیر تغییرمکان‌های گره‌های متقارن ذکرشده ضمن بررسی تطابق قابل قبول آنها میانگین‌گیری به عمل آمده است. در ارائه نتایج میانگین حاصل از آزمایش‌ها، نمودارهای نیرو- تغییر مکان گروه گره‌های الف، ب و ج به طور جداگانه ترسیم شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ضمن برای افزایش دقت آزمایش، لازم به ذکر است که قبل از بارگذاری اصلی و ثبت نتایج آن چند مرحله بارگذاری و باربرداری با اعمال بارهای به نسبت کوچک انجام شده است تا سازه به طور کامل روی تکیه گاه‌ها استقرار یافته و جا به جایی‌های ناشی از خطاهای مجموعه آزمایش حذف شوند. بارگذاری اصلی نیز در دو مرحله اعمال‌شده است تا نتایج در دو مرحله برداشت شده و میانگین نتایج که در اغلب موارد با یکدیگر نزدیک بوده‌اند، مورد استفاده قرار داده شود؛ این خود نمایشگر آن بوده که مطالعات در محدوده رفتاری الاستیک و تغییرمکان‌های برگشت‌پذیر انجام گرفته است. اولین آزمایش در مدل (۱) با میزان سفت‌شدگی طبیعی پیچ‌ها که توسط کارخانه سازنده اجرا شده بود، انجام شد که در نمودارهای مربوط به آن با عنوان نمونه در حالت نصب متداول (با میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها به صورتی که بدون کنترل ویژه، توسط کارخانه سازنده انجام می‌گیرد) معرفی شده است. اما در آزمایش‌های بعدی به ترتیب همه پیچ‌ها با سفت‌شدگی متناظر با قرائت گشتاورسنج معادل ۵۰N.m، ۱۲۰N.m و ۲۰۰N.m سفت شده و آزمایش‌ها

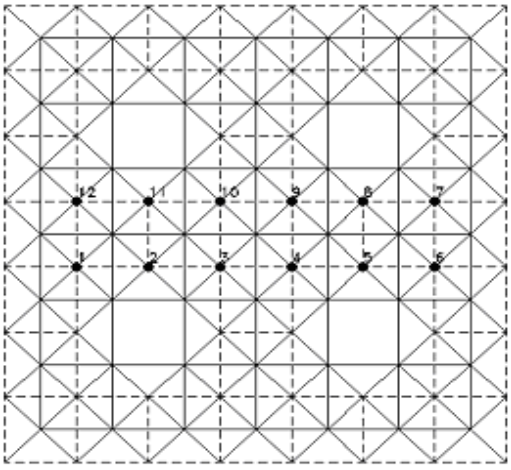
www.SID.ir

Archive of SID

تکرار شده‌اند. در مدل (۲) که با حذف ۴گره و ۳۲ عضو از مدل (۱) به وجود آمده است، آزمایش‌ها به ترتیب با سفت‌شدگی‌های ۵۰ N.m، ۱۰۰N.m ، ۱۲۰N.mو ۱۵۰N.m انجام شد. علاوه بر این‌آزمایش‌ها، مطالعه متفاوتی نیز با اعمال تفاوت در میزان سفت‌شدگی پیچ‌های لایه بالایی و زیرین انجام گرفت. در آزمایش ذکرشده میزان سفت‌شدگی برای پیچ‌های اتصالات کلیه اعضای کششی برابر با ۵۰N.m ایجاد شد. هدف از مطالعه ذکرشده، مقایسه اهمیت تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌های اتصال اعضای فشاری و کششی بر رفتار کلی شبکه فضاکار بوده است. در جریان آزمایش‌ها، در چند مورد گسیختگی‌هایی در پیچ‌ها یا جوش‌ها مطابق شکل(۳) به وجود آمده بود؛



مدل(۱)



مدل(۲)

شکل ۲: محل قرارگیری ترانس دیوسرها در شبکه‌های مورد آزمایش.

در حالی که اعضای مربوط به آن هنوز به حداکثر ظرفیت خود نائل نشده بودند. به عبارت دیگر، اتصال پیوندده به عضو دارای مقاومت کمتری از مقاومت نهایی عضو مربوطه بوده است که این موضوع به طور عمومی در حالت‌های متداول اعمال نکردن پیش‌تنیدگی، نشانه‌ای از نقص طراحی و ساخت شبکه تلقی می‌شود. برای بهره‌گیری مناسب از مقاومت نهایی و شکل‌پذیری اعضای شبکه، توصیه شده است که اتصالات و پیوندده‌ها به نحوی طراحی شوند که شکست یا خرابی در آنها صورت نگیرد [۶]. شکست در مواردی که پس از اعمال پیش‌تنیدگی در شبکه تحت آزمایش اتفاق افتاده، نشانگر آن است که این پیچ‌ها برای ترکیب آثار بارهای کششی وارده از سوی عضو و نیروی پیش‌تنیدگی ناشی از سفت‌کردن اتصال طراحی نشده بودند. بنابراین استنتاج می‌شود که در صورت تمایل به افزایش صلبیت سازه، به ترتیبی که در این مطالعات نشان داده خواهد شد، باید طراحی پیچ‌ها و ادوات اتصال و جوش‌ها برای ترکیب این آثار به عمل آید و این موضوع در مورد پیچ‌ها برای اعضایی که تحت کشش قرار می‌گیرند، اهمیت خاصی دارد.

شکل ۳: دو نمونه از گسیختگی در جوش و پیچ.

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج تجربی آزمایش‌ها

نتایج کلی آزمایش‌ها بر مدل (۱) با عنوان نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای گره‌های گروه (الف) و به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌ها در شکل (۴) ارائه شده است. به همین ترتیب نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای گره‌های گروه (ب) و (ج) به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است .

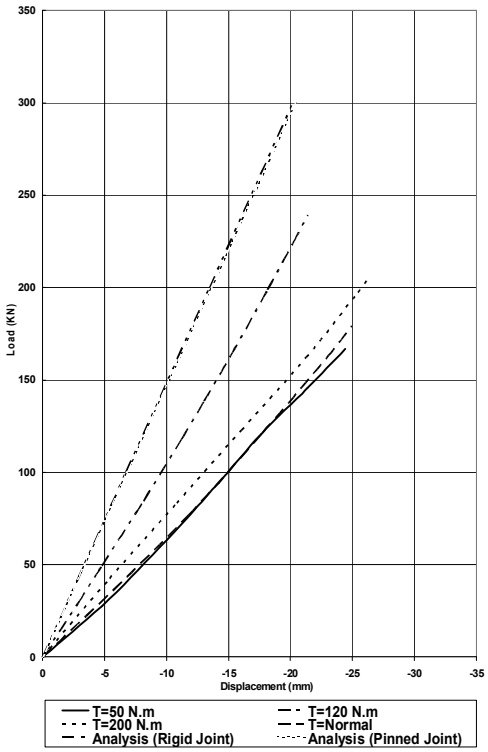
با مطالعه این نمودارها نتایج زیر حاصل می‌شود:

افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۵۰ N.m به ۱۲۰ N.m تغییر مکان گره‌های گروه (الف)، (ب) و (ج) را در حدود ۳۵ درصد کاهش و به عبارت دیگر صلبیت سازه مورد بررسی را در حدود پنجاه درصد افزایش داده است.

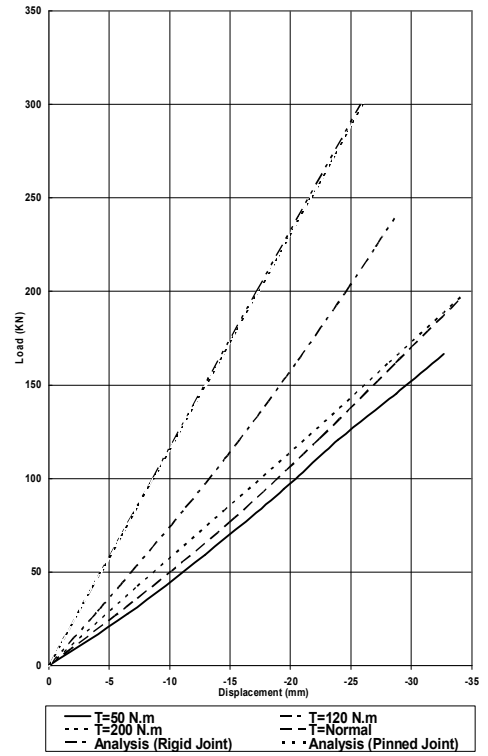
- اما افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۱۲۰N.m به ۲۰۰N.m تغییر مکان گره‌های گروه الف، ب و ج را افزایش داده و به بیان دیگر در صلبیت سازه کاهش مشاهده شده است. در این حالت، علت اصلی را می‌توان به لهیدگی اجزای غلاف نسبت داد که در طراحی سیستم اصلی MERO از مصالح مقاوم‌تری در مقایسه با مصالح ساخته شده در داخل کشور و مورد استفاده نمونه‌های آزمایش‌شده، استفاده می‌شود.
- تغییرمکان گره‌های گروه الف، ب و ج به ازای سفت‌شدگی اولیه انجام شده توسط شرکت سازنده کمی کمتر از مقادیر نظیر آن به ازای سفت‌شدگی ۵۰N.m بوده است و به عبارت دیگر، صلبیت سازه در ازای سفت‌شدگی به میزان تحویل شده از سوی کارخانه سازنده، اندکی بیش از صلبیت سازه در ازای سفت‌شدگی کنترل شده ۵۰N.m بوده است.

همچنین نتایج کلی آزمایش‌ها روی مدل (۲) با عنوان نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای گره‌های گروه (الف)، (ب) و (ج) و به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌ها به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) و (۹) ارائه شده است. از مطالعه نمودارهای مربوط به مدل (۲) نتایج زیر قابل استخراج است :

- با افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها از ۵۰ N.m به ۱۰۰N.m و از ۱۰۰N.m به ۱۲۰ N.m و نیز از ۱۲۰N.m به ۱۵۰N.m تغییر مکان گره‌های گروه (الف)، (ب) و (ج) به طور محسوسی کاهش یافته و در نتیجه صلبیت سازه مورد آزمایش افزایش یافته است.



۴ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه الف از مدل (۱) به روش تجربی و تحلیلی.



شکل ۵ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه ب از مدل (۱) به روش تجربی و تحلیلی.

www.SID.ir

Archive of SID

• در ازای میزان سفت‌شدگی N.m ۱۵۰برای اعضای فشاری و N.m ۵۰ برای اعضای کششی صلبیت سازه نزدیک به حالتی است که کلیه پیچ‌ها دارای همین میزان سفت‌شدگی N.m۱۵۰ باشند .

از مقایسه نتایج تجربی مدل (۱) با مدل (۲) همچین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که صلبیت شبکه دو لایه مدل (۲) در مقایسه با شبکه دو لایه مدل (۱) به میزان کمتری تحت تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها دستخوش تغییرات شده و حساسیت نشان داده است و با توجه به اینکه مدل (۱) در مقایسه با مدل (۲) صلبیت بیشتری دارد، می‌توان انتظار داشت و مقایسه این دو آزمایش نیز این موضوع را تأیید کرده است که در سازه‌های صلب‌تر تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها بر صلبیت سازه بیشتر بوده است. در نهایت پس از مطالعه و بررسی همه نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر شبکه‌های دو لایه مدل (۱) و (۲) می‌توان نتایج را به شرح زیر خلاصه کرد که با توجه به محدود بودن تعداد آزمایش‌ها در تعمیم آن باید جانب احتیاط را رعایت کرد:

• افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها تا حد مناسب (برای نمونه‌های مورد مطالعه حدود N.m ۱۵۰) صلبیت شبکه را افزایش داده، اما سفت‌شدگی بیش از این حد در پیچ‌ها سبب کاهش صلبیت شبکه شده است که این کاهش اغلب به دلیل بروز لهیدگی در غلاف اتصال‌های تحت فشار بوده است. به هر ترتیب باید طراحی پیچ‌ها به منظور جلوگیری از بروز شکست تردگونه پیچ، در صورت اعمال پیش‌تنیدگی قابل ملاحظه، تحت تأثیر ترکیب بارهای ناشی از عوامل وارده بر سازه و همچنین اثر سفت‌شدگی و ایجاد نیروهای پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها به عمل آید.

• افزایش میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در اعضای فشاری به مراتب بیش از سفت‌شدگی پیچ‌ها در اعضای کششی در افزایش صلبیت شبکه مؤثر است.

• حساسیت به میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در شبکه دارای ترکیب هم‌بندی اعضای منتج به صلبیت بیشتر، به مراتب بیش از شبکه با نحوه هم‌بندی منتج با صلبیت کمتر بوده است.

• میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در اجرای شبکه دو لایه مورد نظر توسط کارخانه مجری با توجه به نتایج آزمایش در حدود N.m ۵۰ بوده و در نتیجه صلبیت شبکه مزبور نسبت به حالاتی که در آنها میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها متناظر با گشتاورهای N.m ۱۲۰ و N.m ۱۵۰ بوده است، کاهش قابل توجهی نشان داده است.

• ظرفیت باربری پیچ و جوش در اتصالات شبکه موجود که توسط کارخانه سازنده طراحی و احداث شده بود، گاهی کمتر از ظرفیت باربری اعضای شبکه مورد نظر بوده است که رفع این نقیصه در طرح و ساخت قطعات و اجزای اتصال بسیار ضروری به نظر می‌رسد؛ به ویژه در مواردی که اعمال پیش‌تنیدگی به منظور افزایش صلبیت و کنترل تغییرمکان‌ها مورد نظر است. طراحی باید تحت اثر ترکیبی بارهای وارده و اثر ناشی از پیش‌تنیدگی به نحوی به عمل آید که گسیختگی در پیچ یا سایر ادوات اتصال و جوش‌ها مقدم بر اعضاء اتفاق نیفتد.

مقایسه نتایج تحلیل الاستیک شبکه‌های آزمایش شده در حالت بدون سفت‌شدگی خاص با نتایج آزمایش‌ها در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. این شبکه ها در دو حالت تحلیل شده‌اند. در حالت اول فرض شده است که همه اتصال‌ها اعضای شبکه به یکدیگر به طور کامل مفصلی باشند و در حالت دوم همه این اتصال‌ها به طور کامل صلب فرض شده‌اند . این دو پاسخ به همراه پاسخ‌های تجربی مدل (۱) برای مقایسه در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) و برای مدل (۲) در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) در نمودارهای نیرو- تغییر مکان مربوط به آن رسم شده است. با ملاحظه شیب این نمودارها در مدل‌های (۱) و (۲)، که نمایانگر صلبیت سازه هستند و با مقایسه آنها با یکدیگر، دو نکته به وضوح قابل رؤیت است:

• نخست اینکه شیب نمودارهای تحلیلی با دو فرض اتصالات مفصلی و صلب بسیار به هم نزدیک و به طور تقریبی بر هم منطبق هستند.

• دوم، شیب نمودارهای تحلیلی از شیب نمودارهای تجربی به ازای مقادیر متفاوت سفت‌شدگی‌های پیچ‌ها به شرح توضیح داده شده، افزون‌تر است.

با توجه به اینکه پاسخ تحلیلی شبکه‌ها با فرض اتصالات مفصلی و صلب به طور تقریبی بر هم منطبقند و از طرف دیگر کلیه نمودارهای نیرو- تغییر مکان تجربی به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچ‌ها، نمایانگر صلبیت واقعی کمتر برای شبکه‌ها بوده‌اند ، بنابراین تفاوت پاسخ‌های تحلیلی و تجربی نمی‌تواند ناشی از خطاهای محاسبه صلبیت خمشی اتصالات باشد. چرا که در هر دو

www.SID.ir

Archive of SID

حالت صلبیت خمشی صفر و بی‌نهایت برای اتصالات، پاسخ‌های تحلیلی تقریباً یکسان بوده و در عین حال با پاسخ واقعی تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد تفاوت‌های بین پاسخ واقعی و تحلیلی بیشتر ناشی از خطاهایی است که در تعیین صلبیت محوری مجموعه شامل ادوات و پیوندهها و رواداری‌های اجرایی مربوط به آن و نوع اتصال وجود دارد.

اول، به دلیل آنکه در تعیین صلبیت محوری اعضاء و ادوات اتصال در تمام طول آن در مدل تحلیلی از مشخصات هندسی مقطع لوله استفاده شده است، در حالی که در واقع این مشخصات فقط برای طول واقعی لوله صادق بوده و قطعه انتهایی مخروطی، پیچ، غلاف و گوی در دو طرف المان مقاطع متفاوتی دارند. دوم، در فرضیه‌های متداول تحلیل، چه با فرض اتصالات مفصلی و چه اتصالات صلب، احتمال لقی و لغزش اتصالات که سبب کاهش جدی صلبیت محوری، به ویژه در ابتدای اعمال نیروی محوری بر اتصالات می‌شوند، ملحوظ نمی‌شوند.

همچنین با توجه به رفتار خرپای فضاکار دو لایه که در آن نیروی محوری اعضاء نقش تعیین‌کننده دارد و لنگر خمشی چندانی در اعضاء به وجود نمی‌آید، صلبیت خمشی اتصالات اهمیت قابل ملاحظه ای در رفتار شبکه نخواهد داشت. از طرفی نتایج تجربی نشان می‌دهد که صلبیت شبکه به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچها تغییر می‌کند و در نتیجه تفاوت در پاسخ سازه به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچها نشانگر تأثیر میزان سفت‌شدگی‌پیچها بر صلبیت محوری اتصالات نیز هست.

نتیجه‌گیری

شبکه‌های مورد آزمایش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. لازم به تأکید دوباره است که با توجه به تعداد محدود آزمایش‌های انجام شده و ویژگی‌های شبکه‌های مورد مطالعه، نتایج زیر در همین چارچوب قابل ارائه بوده و نمی‌توان این نتایج را بدون مطالعات گسترده‌تر برای شبکه‌های متنوع دیگر تعمیم داد.

۱. افزایش میزان سفت‌شدگی پیچها تا حد مناسب (حدود متناظر با گشتاور ۱۵۰N.m) صلبیت سازه را افزایش داده، اما با توجه به نوع و مصالح ادوات اتصال مشاهده شد که سفت‌شدگی بیش از این حد در پیچها سبب کاهش صلبیت سازه به دلیل اعمال صدمه‌های موضعی به ادوات اتصال در مدل‌های آزمایش شده می‌شود.

۲. افزایش میزان سفت‌شدگی پیچها در اعضای فشاری به مراتب بیش از سفت‌شدگی پیچهای اعضای کششی، در افزایش صلبیت سازه مؤثر است.

۳. با توجه به شیب نمودار نیرو - تغییرمکان صلبیت شبکه مدل(۱) حدود ۴۰ درصد از صلبیت شبکه مدل (۲) بیشتر است و از طرفی حداکثر تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچها بر صلبیت شبکه مدل(۱) حدود چهار برابر شبکه مدل (۲) بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد تأثیر میزان سفت‌شدگی پیچها بر تغییر مکان شبکه‌های صلب‌تر افزون‌تر است.

۴. شیب نمودارهای نیرو- تغییر مکان به روش تحلیلی با دو فرض اتصالات مفصلی و صلب به طور تقریبی یکسان بوده، اما از شیب نمودارهای تجربی به ازای کلیه سفت‌شدگی‌ها برای پیچها، افزون‌تر است. به عبارت دیگر، صلبیت واقعی به دست آمده برای سازه‌ها به روش تجربی حتی با مناسب‌ترین میزان سفت‌شدگی پیچها از صلبیت به دست آمده به روش‌های متداول تحلیلی بدون در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری اتصالات پیوندهها به میزان قابل ملاحظه‌ای که مقادیر کمی آن در متن مقاله ارائه شده است، کوچک‌تر بوده است و این موضوع نشان‌دهنده ضرورت تدوین نرم‌افزارهای دربرگیرنده این آثار در تحلیل سازه‌های فضاکار است که در این زمینه مطالعاتی به عمل آمده است.

۵. نتایج کلی حاصل از مطالعات تجربی و تحلیلی به تفاوت در پاسخ سازه (تغییر مکان قائم گره‌ها) تحت بارگذاری معین به ازای سفت‌شدگی‌های متفاوت پیچها نشانگر آن است که افزایش میزان سفت‌شدگی پیچها تا حد مناسب، علاوه بر اثر افزاینده آن در صلبیت خمشی اتصال و تأثیر ناشی از آن در کاهش طول مؤثر اعضای فشاری، منجر به کاهش میزان لغزش و لقی اتصالات و افزایش صلبیت محوری اتصال مورد مطالعه نیز می‌شود.

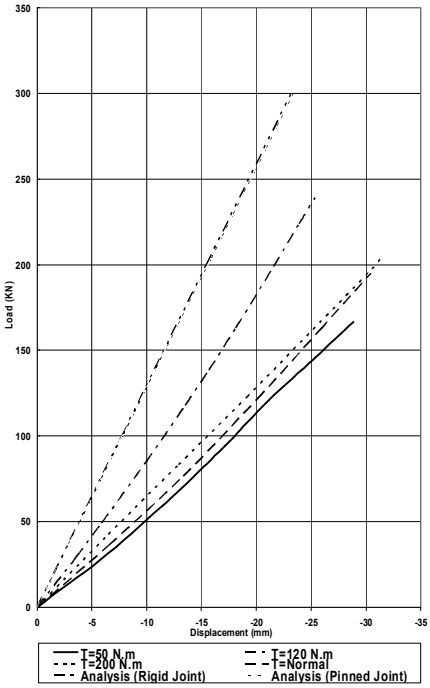
۶. با ایجاد سفت‌شدگی مناسب برای پیچها (حداکثر در حدود ۱۵۰N.m) می‌توان تغییرمکان سازه را کاهش داد. بنابراین در سازه‌های فضاکار موجود نیز با ایجاد سفت‌شدگی مناسب‌تر می‌توان به یک خیز کمتر برای

www.SID.ir

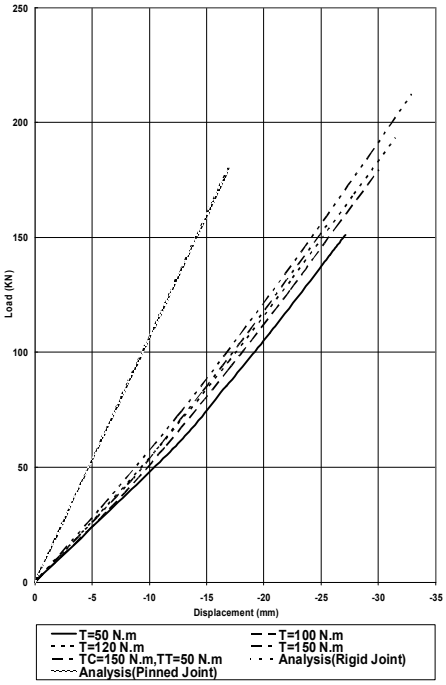
Archive of SID

بهره‌برداری مطلوب‌تر دست یافت و یا در طرحی بر اساس خیز مجاز، با ایجاد سفت‌شدگی مناسب‌تر می‌توان ظرفیت باربری سازه را افزایش داد.

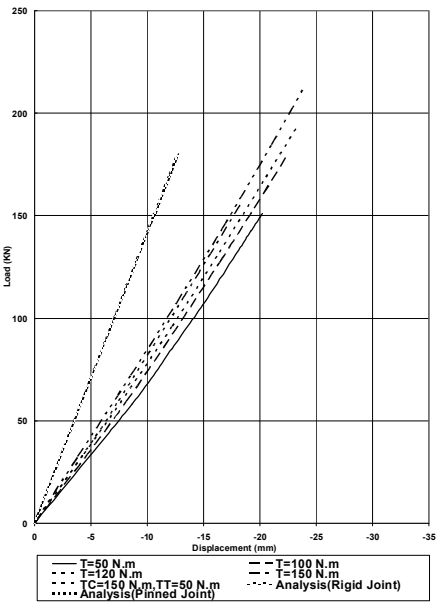
۷. ظرفیت باربری پیچ و جوش در اتصالات سازه فضاکار نمونه طراحی‌شده به روش‌های متداول توسط کارخانه سازنده در بعضی موارد کمتر از ظرفیت باربری اعضای سازه بوده است که رفع این نقیصه در طرح و ساخت قطعات و اجزای اتصال، به ویژه با توجه به اثر ترکیبی بارهای وارده بر سازه و نیروی پیش تنیدگی اعمالی، ضروری خواهد بود.



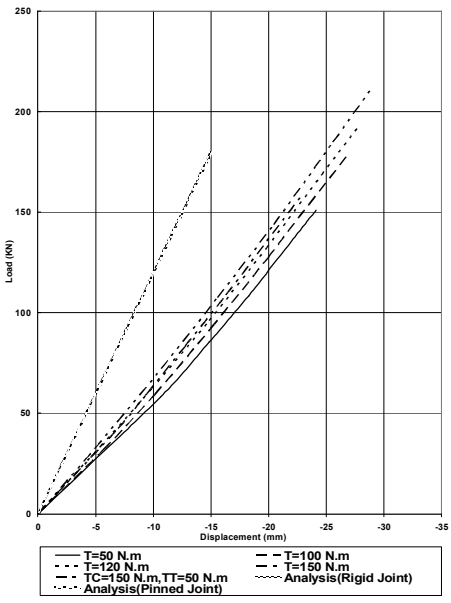
شکل ۶ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه ج از مدل (۱) به روش تجربی و تحلیلی .



شکل ۷ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه الف از مدل (۲) به روش تجربی و تحلیلی.



شکل ۸ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه ب از مدل (۲) به روش تجربی و تحلیلی .



شکل ۹ : نمودار نیرو تغییر مکان گره‌های گروه ج از مدل (۲) به روش تجربی و تحلیلی.

www.SID.ir

Archive of SID

تقدیر و تشکر

آزمایش‌های گزارش شده در این مقاله در دانشگاه صنعتی بابل و با همکاری‌های صمیمانه جناب آقای دکتر محمدرضا داودی و جناب آقای مهندس امین مصطفویان به عمل آمده است. نمونه آزمایش توسط مجتمع صنایع خودکفایی سپاه طراحی و احداث شده است که نویسندگان بر خود لازم می‌دانند بدین‌وسیله از همکاری‌های به عمل آمده تقدیر کنند.

مراجع

1 - Schmidt, L. C, Morgan. P. R and Hanaor. A. (1982). "Ultimate Load Testing of Space trusses." *Journal of Structural Division, ASCE,* Vol. 108, No. 6, PP. 1324-1335.

2 - Fathelbab, F. A. and mcConnel, R. E. (1989*). Approximate Tangent Stiffness Matrix Includes the Effects of Joint Properties for Space Frame Member, procceding of the International Conference on 10 Years of progress in Shell and Spatial Structures,* Vol. 5, Madrid.

3 - Murakami, M. (1992). "Numerical Analysis of Elastic Buckling of Single- Layer Latticed Dome Under Gravity Load." *Proceeding of International Congress of IASS- CSCE*, Canada, PP. 576- 586.

4 - kitipornchai, S., Al-Bermani, F. G. A. and Peyrot, A. H. (1994). "Effect of Bolt Slippage on Ultimate Behaviour of Lattice Structures." *Journal of structural Engineering*, Vol. 120, No. 8, PP. 2281-2287.

5 - Chenaghlou, M. R. (1997). *Semi- Rigidity of Connections in space Structures,* Ph.D. Thesis, University of Surrey, October.

6 - Maalek, S. (1999). "Structural Assesment and quality control procedures for the Homa Air-craft Hangar No3." *International Journal of Space Structures Special Issue on Air- craft- Hangars*, Vo1.14, No. 3.

7 - Yamada, M. and Sato, Y. (2000). "On the Three Dimentional Deformation of Joint parts of a Space truss System." *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ*, Tyugoku, Japan.

8 - Vaseghi, J. and Alibeygi, M. H. (2002). "Parametric evaluation to induce a modified design in double layer grid space frames." *Proceeding of International Conference of space Structure*, University of Surrey, UK, PP. 721-728.

9 - Fulop, A. and Ivanyi, M. (2004). "Experimentally analyzed Stability and ductility behaviour of a space- truss roof System." *Journal of Thin- Walled Structures*, Vol. 42, PP. 309-320.

10 - Pashaei, M. (2005). *Damping charactristics of Mero-Type Double Layer Grids,* Ph.D. Thesis, University of Surrey.

11 - Davoodi, M. (2005). *Effects of Bolt Tightness on the Behaviour of Mero-Type Double Layer Grids*, Ph.D. Thesis, University of surrey.

www.SID.ir