

طراحی عملکردی ساختمان Main ۱۱۱ در شهر Salt Lake City

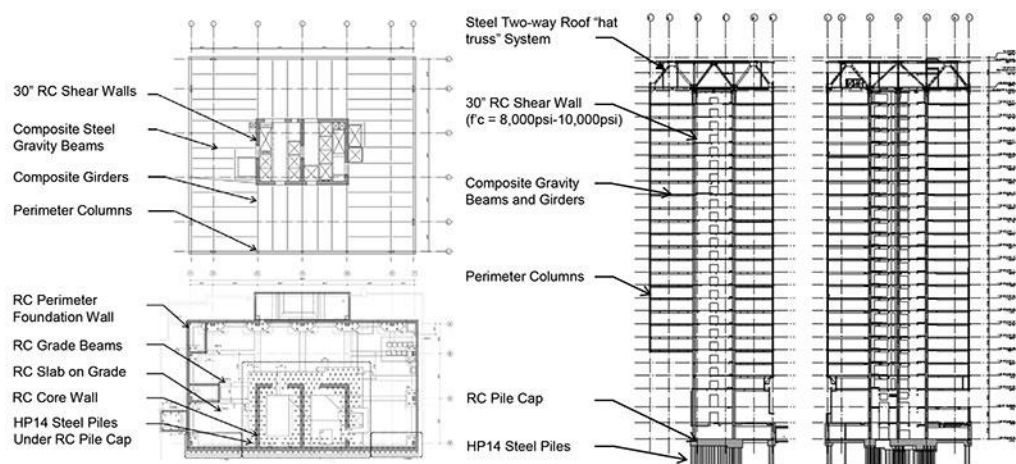
سیستم دیوار هسته بتنی مسلح ساختمان Main ۱۱۱ موجب ایجاد تکیه گاه جانبی و قائم برای برج اداری ۲۵ طبقه با طراحی خلاقانه به صورت معلق در مجاورت مرکز هنری می شود.

برج اداری Main ۱۱۱ که در ناحیه‌ای با لرزه خیزی زیاد در مجاورت ناحیه سالت لیک در ناحیه دارای گسل واقع شده است دارای مساحت ۵۱۰۴۵۵ فوت مربع بوده و به عنوان فضای اداری رده A شناخته می شود. ارتفاع ساختمان ۲۵ طبقه حدود ۳۸۷ فوت بالاتر از سطح بوده و دارای یک سیستم خرابایی کلاهی دار فولادی در تراز بام با تمامی ستون‌های محیطی معلق برای آویز هوایی در مجاورت مرکز هنری می باشد. چالش‌ها و رویکردهای کلی طراحی پروژه در مجله STRUCTURE در ژوئن ۲۰۱۶ ارائه و مورد بحث قرار گرفته است. این مقاله به بررسی روش‌های طراحی لرزه‌ای عملکرد محور دو مرحله‌ای به وسیله گروه طراحی در طی توسعه طرح پروژه، بازنگری اولیه و فرآیند دفاع (اثبات کارایی طرح) می پردازد. این سازه که مطابق با الزامات حداقلی آیین نامه IBC و استاندارد ASCE-7-10 طراحی شده است، دارای یک سیستم دیوار هسته بتنی مسلح شکل پذیر می باشد که بیشتر از محدوده ارتفاعی ۱۶۰ فوت مطابق با جدول ۱۲.۲.۱ آیین نامه ASCEY-10 می باشد؛ بنابراین در طی طراحی یک جایگزین غیر الزام آور با توجه به بخش ۱۰۴.۱۱ IBC ارائه شده و روش‌های طراحی لرزه‌ای عملکرد محور با توجه به استانداردهای مرکز تحقیقات مهندسی زلزله پاسیفیک (PEER) آیین نامه‌های ساختمان‌های بلند (۲۰۱۰) مد نظر قرار گرفته‌اند. بر اساس استاندارد TBI، آیین نامه معادل یا عملکرد بهتر در حداکثر اندازه تقاضای زلزله در نظر گرفته شده (۲٪، MCE_R در ۵۰۷۲، APR ۲۴۷۵) نشان داده می شود. در طی ساخت Main ۱۱۱، زمان بندی تکمیل پروژه در ماه آگوست ۲۰۱۶ در نظر گرفته شده است.



طراحی دو مرحله‌ای عملکرد محور

علاوه بر چالش گسترده طراحی در مورد اتصال هر ۱۸ ستون فولادی محیطی از خرپاهای بام پنت هوس به منظور اتصال آویز در مرکز هنری ۴ طبقه جدید به صورت مستقیم به جنوب برج، پروژه طی یک طراحی و زمان بندی ساخت سریع به منظور دستیابی به ضرب الاجل و تعهدات پروژه ساخته شده است. در طی فرآیند مرحله ۱، تعیین نهایی ابعاد طراحی دیوار هسته بتنی مسلح شامل ضخامت‌ها، بازشوها، نواحی مرزی و تیرهای پیوند با استفاده از تحلیل و طراحی طیف پاسخ خطی سه سویه صورت می‌گیرد. در طی فرآیند مرحله ۲ که شامل نواحی ارائه شده توسط بخش بازننگری طراحی لرزه‌ای (SDRP) می‌باشد، گروه تحلیل پاسخ غیرخطی سه سویه (NLRHA) را به منظور نشان دادن این که طراحی سازه در مرحله ۱، ضوابط طراحی غیرالاستیک عملکردی مراجع PEER TBI را برآورده می‌کند، صورت می‌گیرد.



شکل ۱. شرح سیستم‌های سازه

طیف‌های پاسخ محلی و حرکات لرزه‌ای زمین

طیف‌های پاسخ محلی و حرکات زمین برای زلزله با حداکثر اندازه در نظر گرفته شده (MCE_R) با توجه به الزامات ASCEY-10 توسط مهندس ژئوتکنیک، URS و SDRP ارائه شده‌اند. طیف MCE_R به صورت مقدار کمتر MCE_R تعیینی و احتمالاتی حرکات زمین، ارائه شده‌اند. به منظور بررسی پاسخ سازه تحت تکیه گاه کلاهدار، طیف قائم بر اساس نسبت‌های V/H میانی گولرس و آبراهمسون با تعریف دو مجموعه طیف پاسخ قائم خطی ارائه شده است. در مورد روند NLRHA مرحله ۲، دو رشته از هفت مجموعه تاریخچه‌های زمانی حرکات زمین سه مؤلفه‌ای، مقیاس بندی شده نسبت به طیف MCE_R انتخاب شده‌اند. هر کدام از هفت حرکت زمین به صورت تصادفی مطابق توصیه SDRP دچار چرخش شده‌اند.

شرح سیستم‌های سازه ای

سازه به صورت طبقات قاب بندی شده شامل عرشه کامپوزیت فولادی WF و دال با ستون‌های W14 محیطی مطابق شکل ۱ می‌باشد. هسته دیوار برشی بتنی مسلح شکل پذیر شامل دیوارهایی به ضخامت ۳۰ in کشیده شده از بالای تراز پایه شمع‌های کلاهدار تا پایین پنت هوس خرپایی در طبقه ۲۵ می‌باشد. دیوارهای هسته در دو خط شبکه در جهت شرقی- غربی طراحی شده (۶۲ فوت و ۶ اینچ) و سه خط شبکه در جهت شمال- جنوب (۴۲ فوت و ۹ اینچ) با استفاده از بتن خود تراکم با مقاومت ۸۰۰۰ psi به جز در طبقه ۲۴ در پایین خرپاهای کلاهدار که در آن ۱۰۰۰۰ psi مورد نیاز می‌باشد. بارهای ستون‌های

محیطی حدود ۴۰٪ از بار ثقلی ساختمان بوده و بارهای زنده از خرپاهای بام به بالای دیوارهای هسته به وسیله شش تکیه‌گاه فولادی سازه‌ای کروی منتقل می‌شوند. بارهای دیوار هسته به سیستم شالوده عمیق شامل شمع‌های HP فولادی تا عمق ۱۰۰ فوت و رده پایین‌تر با شمع‌های HP ۳۷۳ منتقل می‌شوند.

مرحله ۱: طراحی و تحلیل خطی سه بعدی

گروه طراحی نسبت به استفاده از تحلیل طیف پاسخ مودال دینامیک خطی (MRSA) در طی ارائه فاز طراحی به مدت ۱۹ هفته به منظور نهایی کردن تعیین ابعاد، طراحی و مقادیر سیستم دیوار باربر بتنی مسلح شکل پذیر با چالش قابل توجهی مواجه بوده است.

این جزئیات پیش از ساخت یک مدل تحلیل سه بعدی غیرخطی به منظور نشان دادن تطابق ضوابط قابل قبول سطح TBI MCE_R طراحی عملکرد محور مورد نیاز می‌باشند. استراتژی دو مرحله‌ای موجود در مرحله ۱ MRSA خطی و مرحله ۲ دوم تعیین تحلیل غیرخطی نتایج مرحله ۱ می‌باشد که در طی فاز طراحی و تبیین اسناد نهایی ساخت لحاظ می‌شود.

یک مدل تحلیلی خطی سه بعدی با استفاده از برنامه ETABS (نسخه ۲۰۱۳) برای MRSA با میرایی مودال ۵٪ ارائه شده است. سیستم مقاوم نیروی لرزه‌ای سازه (SFRS) مدل سازی شده و شامل مسیر بار سیستم سازه جانبی و ثقلی کامل از شالوده‌ها (به صورت مفصلی در تراز پایه) دیوارهای پایه، دیافراگم طبقه ۱، دیوارهای هسته، خرپاهای کلاهدار، قاب کف، ستون‌های آویز محیطی و تکیه‌گاه‌های سازه‌ای در بالای دیواره‌های هسته خرپاهای طبقه ۲۵ مدل سازی شده است. از اصلاح کننده‌های سختی مطابق با توصیه (۲۰۱۰) PEER/ATC ۷۲-۱ برای المان‌های ثقلی و جانبی بتن به منظور احتساب خصوصیات مقطع ترک خورده در طی رخداد لرزه‌ای مطابق با جدول ۱ با فرضیات محافظه کارانه دیگر برای سختی برشی دیوار هسته و المان‌های تیر پیوند و همچنین سختی کران پایین برای دیافراگم تراز زمین استفاده شده است.

المان	EI	GA
دیوار پایه	۰,۲۰	۰,۱۲
دیوار برشی هسته	۰,۵۰	۱,۰۰
تیر پیوند	۰,۱۵	۱,۰۰
دیافراگم طبقه ۱	۰,۲۰	۰,۱۲
دیافراگم برج	۰,۵۰	۰,۵۰

جدول ۱. اصلاح کننده‌های سختی استفاده شده در این مرحله

به منظور برآورد تقاضاها در تراز MCE_R با استفاده از MRSA مرحله ۱، از مقادیر محافظه کارانه تر ضرایب اصلاح پاسخ سیستم بر اساس شکل پذیری برای دیوار باربر استفاده شده است و سپس سیستم به وسیله الزامات آیین نامه (ASCE-۱۰) مورد اشاره قرار گرفته است ($R=5$ در MCE_R ۲/۳). این مقادیر بر اساس جدول ۲ مبتنی بر تحقیقات اخیر در وینار NEES، تحلیل و طراحی دیوارهای بتنی خمشی به وسیله لمانو لوییس (۲۰۱۳) می‌باشند. تحقیق شامل یک برنامه آزمایشگاهی با مقیاس ۱/۳ با تمامی نمونه‌های دیوار اجرا شده با تغییر پارامترها مطابق با الزامات ACI-۳۱۸-۱۱ همراه با مدل سازی برآورد گسیختگی احتمال محور FEMA P۹۶۵ می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیق، ضرایب R برای سیستم‌های مختلف دیوار بتنی با ارتفاع بلند جهت رسیدن به احتمال شکست ۲۰٪ در MCE_R حدود ۳,۵ بوده است که این مقدار به مراتب کمتر از مقدار تعیین شده در ASCE ۷-۱۰ بوده و بایستی تقاضای برشی در دیوار هسته را به وسیله ضریب اضافه مقاومت خمشی و ضریب تشدید

دینامیکی افزایش داد. از این روش برای ساختمان Main ۱۱۱ با استفاده از $R=3.5$ برای اثرات تغییر شکل کنترل شده و $R=2$ برای اثرات کنترل شده استفاده شده است. در تقاضاهای سطح MCE_R ، خصوصیات مصالح مورد انتظار و ضریب کاهش ظرفیت، $\phi=1.0$ مطابق جدول ۳ اندازه گیری شده‌اند.

عضو	R_y و R_x	R_z
تیر پیوند	۳,۵	۱,۰
خمش در دیوار برشی	۳,۵	۱,۰
برش در دیوار برشی	۲,۰	۱,۰
خرپای فولادی بام	۲,۰	۱,۰
ستون آویز فولادی	۲,۰	۱,۰
سیستم شالوده	۲,۵	۱,۰

جدول ۲. ضرایب در سطح MCE_R استفاده شده در مرحله ۱

مصالح	مقاومت مورد انتظار
فولاد مسلح در بتن	$1.17f_y$
بتن	$1.3 f'_c$
فولاد ASTM A۹۹۲/A۵۷۲	$1.1 f_y$

جدول ۳. خصوصیات مصالح مورد انتظار ($\phi=1.0$)

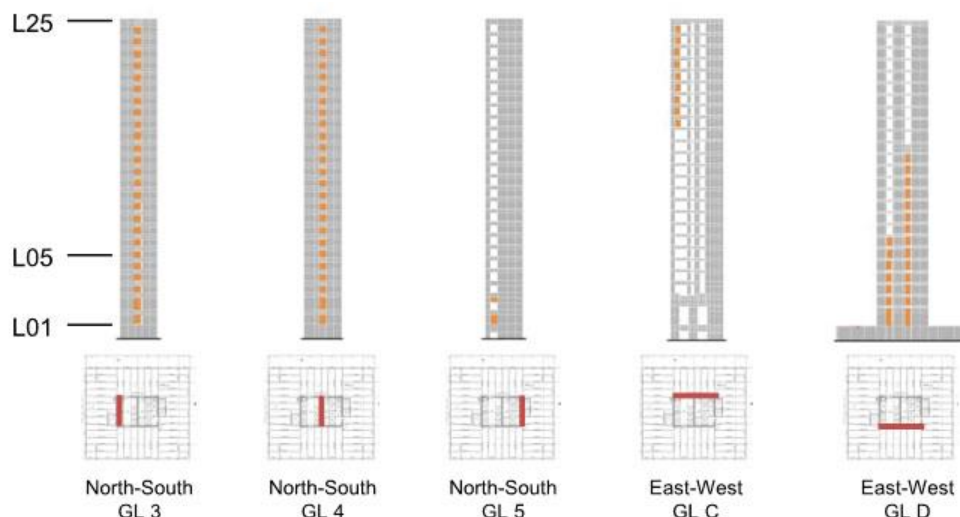
با توجه به این که IBC ۲۰۱۲ و ASCE 7-10 به‌طور ملموس ترکیبات جهت دار را برای بار لرزه‌ای قائم نشان نمی‌دهند، بخش ۲۶-۳,۲ آیین نامه (۲۰۰۰) ASCE 4-98 برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های دارای دیوار هسته به‌منظور تأمین ایمنی جهت تعریف ترکیبات بار لرزه‌ای قائم و افقی ترکیبی ارجاع داده شده است. همراه با بخش ۷,۶,۱ آیین نامه (۲۰۱۰) PEER TBI، ترکیبات بار لرزه‌ای سه سویه استفاده شده در تحلیل مرحله ۱ در MCE_R به‌صورت زیر می‌باشند که L_{exp} مقدار بار زنده مورد انتظار (۲۵٪ بار زنده کاهش نیافته) می‌باشد:

$$1) 1.0D + L_{exp} \pm 1.0E_x \pm 0.4E_y \pm 0.4E_z$$

$$2) 1.0D + L_{exp} \pm 0.4E_x \pm 1.0E_y \pm 0.4E_z$$

$$3) 1.0D + L_{exp} \pm 0.4E_x \pm 0.4E_y \pm 1.0E_z$$

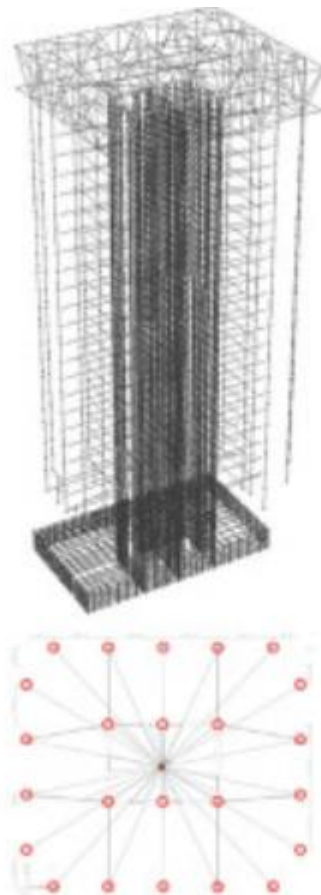
با توجه به در نظر گرفتن بازشوهای دیوار هسته توسط گروه طراحی معماری / MEP و تحلیل مقدماتی تمرکز تنش برشی بالای تیر پیوند و دیوار، گروه طراحی سازه بازشوهای جدید و اصلاح شده را به‌منظور کاهش تمرکز تنش در سختی طبقه و تغییرات مقاومت مطابق شکل ۲ معرفی کرده است. تیرهای پیوند اضافی متصل به این بازشوها به‌صورت قابل توجه موجب افزایش شکل پذیری سازه و در عین حال متعادل کردن سختی در امتداد خطوط شبکه دیوار هسته موازی می‌گردند.



شکل ۲. بازشوهای جدید و اصلاح شده جهت کاهش تمرکز تنش و افزایش شکل پذیری

مرحله ۲: تحلیل و طراحی غیرخطی سه بعدی

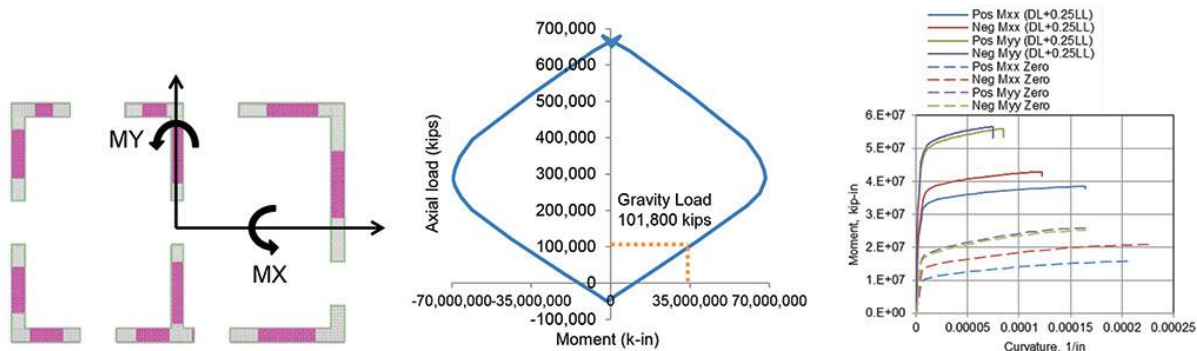
با توسعه و طراحی SFRS های تعیین شده از فرآیندهای الاستیک خطی مرحله ۱، از فرآیند تحلیل غیرخطی مرحله ۲ به منظور ارزیابی طراحی با استفاده از فرآیندهای PEER TBI و ضوابط قابل قبول در طی فاز تهیه اسناد پروژه ساخت استفاده شده است. منظور از فرآیندهای خاص پروژه و ضوابط، توصیه همکاری SDRP در تأیید نهایی، طراحی و اجرای سازه می باشد. ورودی SDRP شامل بررسی های عملکردی اضافی مطابق باهدف مراجع PEER TBI می باشد. این مراجع یک روش جایگزین را نسبت به روش های مقرر برای طراحی لرزه ای در ASCEY باهدف طراحی ساختمان ها با استفاده از سیستم های غیر الزام آور عملکرد معادل که قادر به دستیابی به اهداف عملکردی لرزه ای ساختمان های با کاربری رده II می باشند، ارائه کرده اند. مراجع پاسخ غیر الاستیک رفتار کلی سازه و اعضای سازه را با استفاده از NLRHA در طی عملکرد محدود کننده گسیختگی سطح MCE_R در نظر گرفته اند. ضوابط پذیرش ساختمان Main ۱۱۱ شامل در نظر گرفتن اثرات مهار تراز پایه محصور شده، حدود جابه جایی جانبی باقی مانده و درون طبقه و همچنین در نظر گرفتن عملکرد نیرو و تغییر شکل المان کنترل شده در SFRS و MCE_R می باشد. خدمت پذیری در رخداد زلزله ۴۳ ساله در نظر گرفته شده است، اما تقاضاهای طیفی به مراتب کمتر از تقاضاهای حاصل از طیف MCE کاهش یافته توسط ضرایب اصلاح پاسخ مرحله ۱ می باشند. بنابراین، سازه به صورت الاستیک باقی مانده و معیار عملکرد کاربردی سطح سرویس را برآورده می کند.



شکل ۳. مدل تحلیلی غیرخطی ۲D-PERFORM

مدل سازی تحلیل غیرخطی مرحله ۲

مدل تحلیلی غیرخطی سه بعدی با استفاده از برنامه با استفاده از برنامه ۲D-PERFORM (CSI، نسخه ۲۰۱۱) در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل شامل دیوارهای هسته، ستون‌های آویز و المان‌های خرپای کلاهدار شامل SFRS و مسیر بار به منظور مقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای قائم و افقی می‌باشند. در تراز قاب‌های فولادی معمول، جرم‌ها در ستون‌های محیطی و محل دیوار هسته با دیافراگم‌های صلب در طبقات ۲ تا ۲۴ متمرکز شده‌اند. مدل در تراز شالوده بدون فنرهای تکیه‌گاهی خاکی مدل سازی در دیوارهای پایه ارائه شده است. المان دیوار برشی با استفاده از دو الیاف بتنی و فولادی در المان چشمه اتصال و چهار الیاف در هر المان ناحیه مرزی مدل سازی شده است. تیرهای همبند با استفاده از پنج مدل متفاوت با توجه به شکل میلگردها و نسبت ابعاد با استفاده از دو تیر مسلح قطری و معمولی مدل سازی شده‌اند. خصوصیات مصالح مدل بر مبنای تحقیق اخیر و نتایج آزمایش می‌باشند.

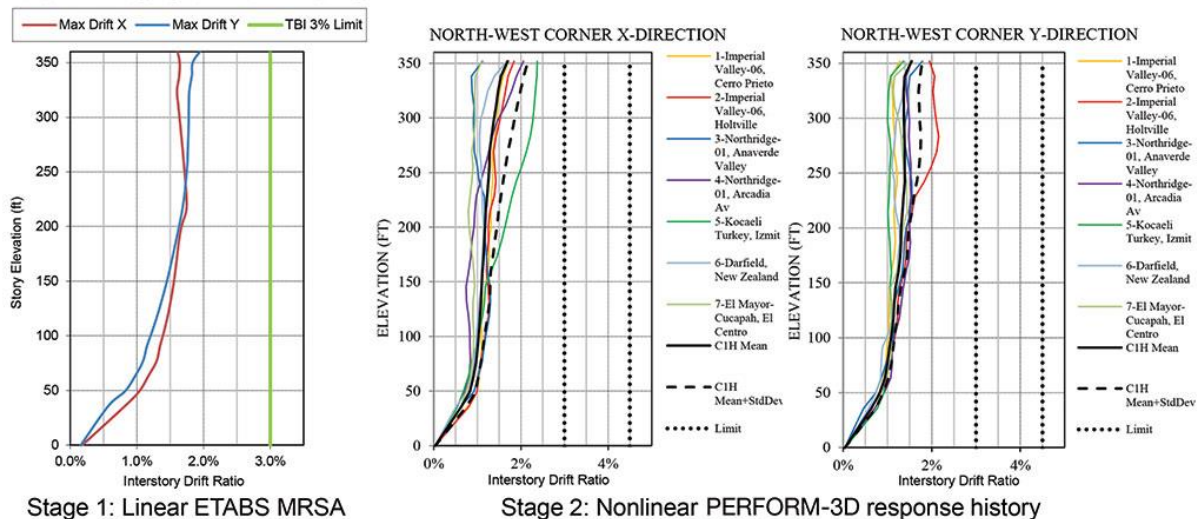


شکل ۴. تحلیل مقطع عرضی الیافی دیوار هسته

تحقیقات عملکردی

چند تحقیق مهم به منظور ارزیابی سازه و مدل پیش از آغاز کار با NLRHA به منظور پاسخ به سؤالات مطرح شده توسط SDRP انجام شده‌اند. این تحقیقات شامل اثرات بار ثقلی خرابی کلاهک دار بر شکل پذیری و مقاومت هسته بتن، ظرفیت لنگر تسلیم نسبت به ترک خوردگی هسته، مفاهیم طراحی محور- تغییر مکان با ارزیابی توزیع نسبت میلگردهای قائم و مقاومت تیر همبند نسبت به مقاومت خمشی هسته در کل ارتفاع سازه دیوار هسته می‌باشند شکل ۴ نشان دهنده رفتار غیرخطی دیوار هسته با استفاده از یک مدل الیافی مقطع عرضی هسته (XTRACT) با در نظر گرفتن اثرات انحنای خمشی و لنگر- نیروی محوری کل می‌باشند که مؤید افزایش قابل توجه در مقاومت خمشی ناشی از بارهای فشاری اضافی ترک خوردگی خرابی کلاهک دار نسبت به ظرفیت خمشی تسلیم در ترازهای بالاتر با نسبت میلگرد خمشی کم در نظر گرفته شده است.

MAX INTERSTORY DRIFT RATIO



شکل ۵. خلاصه‌ای از تقاضای جابه‌جایی جانبی درون طبقه مرحله ۱ و مرحله ۲

خلاصه‌ای از نتایج مرحله ۱ و ۲

خلاصه نتایج تحلیل نشان دهنده رابطه مناسب در مقایسه مرحله ۱ (MRSA) و مرحله ۲ (NLRHA) می‌باشد. هر چند که تقاضاهای نسبت جابه‌جایی جانبی درون طبقه غیر الاستیک MCE_R (شکل ۵) مشابه می‌باشند، تحلیل غیرخطی مرحله ۲ نشان دهنده باز توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های برشی حداکثر در پایه می‌باشد. این خلاصه‌ها و همچنین نتایج مرحله ۲ شامل

مقادیر حدی کرنش‌های دیوار در بتن محصور و غیر محصور، دوران‌های تیر همبند و تقاضای جابه‌جایی جانبی باقی مانده، نشان دهنده تطابق کامل با ضوابط طراحی پروژه و باهدف عملکردی ۱۰-ASCE برای ساختمان‌های با کاربری گروه ۳ می‌باشند.

نتیجه گیری

با توجه به زمان بندی ساخت پروژه و روند شتابان آن، گروه طراحی سازه‌ای SOM یک روش عملکرد محور دو مرحله‌ای را که مستلزم همکاری نزدیک با SDRP جهت دستیابی به اهداف عملکردی و تحقق ضرب‌الاجل‌های پروژه می‌باشد، ارائه کرده است. با استفاده از یک فرآیند MRSA ساده شده مرحله ۱، روش دو مرحله‌ای به‌منظور سازمان دهی اولیه سیستم نیروی مقاوم لرزه‌ای با گروه‌های معماری و طراحی MEP بدون در نظر گرفتن کیفیت روند سازه‌ای در طراحی نهایی ارائه شده است. می‌توان از روش ساده شده مرحله ۱ به‌صورت مفهومی و طراحی تکیه‌گاه‌های دیوار هسته بلند در مناطق لرزه خیز به‌منظور ارزیابی امکان سنجی طراحی بدون نیاز به تحلیل غیرخطی پیچیده استفاده کرد. خوانندگان می‌توانند جهت کسب جزئیات بیشتر از این روش عملکردی دو مرحله‌ای، از مقاله SEAOC ۲۰۱۵ توسط مؤلفین این مقاله تحت عنوان طراحی عملکردی ساختمان Main ۱۱۱ استفاده کنند.

مترجم: امیر رضا بخشی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=۱۰۳۸۵>