

روش تحلیل پوش آور (Push over) کران بالا برای تخمین نیازهای لرزه ای در ساختمانهای بلند

محسن گرامی ۱ ، یحیی شربتی ناوان ۲ ، عباس سیوندی پور ۳

۱- Mgerami@semnan.ac.ir

۲- y_sharbati@yahoo.com

۳- abbas.sivandi@gmail.com

چکیده

وقتی که نیازهای لرزه ای ساختمانهای بلند ارزیابی می شود، مهندسان میل دارند از روشهای تحلیل استاتیکی غیر خطی ساده شده یا تحلیل های پوش آور به جای تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی پیچیده استفاده کنند. از زمانی که روشهای معمول دارای برخی اشکالات در پیش بینی نیازهای لرزه ای غیر الاستیک برای ساختمانهای بلند بودند، بعضی روشهای اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله، یک روش تحلیل بار افزون ساده شده جدید که مود های بالاتری را در نظر می گیرد، پیشنهاد می شود. پنج ساختمان با ارتفاع متفاوت برای کاربرد روش پیشنهادی استفاده شده است. سه نوع تحلیل دیگر برای مقایسه با این روش انجام می گردد. این نتیجه حاصل شد که روش پیشنهادی می تواند به طور دقیق پاسخ های مهم ساختمانهای بلند مانند تغییر مکان بام ، نسبت جابجایی نسبی طبقات و چرخش مفاصل پلاستیک را تخمین بزند.

کلمات کلیدی: تحلیل استاتیکی غیر خطی ، ساختمان بلند ، ترکیب مود ، طیف پاسخ ، نیاز لرزه ای

مقدمه

در روش تحلیل بار افزون مثلثی افزایشی TLP (Triangular Load Pushover) پاسخ های لرزه ای که در معرض بارهای جانبی قرار دارد، بوسیله تحلیل استاتیکی غیر خطی محاسبه می شود. این نیروها به طور یکنواخت افزایش می یابند (با توزیع ثابت بر حسب ارتفاع) تا اینکه سازه به تغییر مکان از قبل تعیین شده برسد. وقتی سازه ها تحت مود اول کنترل می شوند (یعنی مود اول، مود غالب می باشد) این روش تخمین نسبتاً خوبی از تغییر شکل های محلی به دست می دهد. هر چند اگر اثر مودهای بالاتر مهم باشد این روش به طور واضح دارای عیب می باشد. در تحلیل پوش آور پیشنهادی، اثر مودهای بالاتر را در نظر گرفته میشود و قوانین ترکیب مودال الاستیک را دنبال خواهد کرد. برای ساختمانهای کوتاه و متوسط ، این روش دارای دقت بیشتری در پیش بینی تغییر مکان بام و نسبت جابجایی طبقات نسبت به روش TLP دارد اما این روش ها در ارزیابی ساختمانهای بلند مرتبه دارای اشکالات خاصی می باشند. ثانیاً نمی توانند به طور دقیق مقدار چرخش نهایی مفاصل پلاستیک که یکی از معیارهای مهم در ارزیابی ایمنی ساختمانها می باشد را تخمین بزنند. به منظور بهبود اعتبار ارزیابی پاسخ های لرزه ای ساختمانهای بلند و اطمینان از اینکه روشهای فوق محافظه کارانه می باشد این تحقیق برای یافتن یک روش تحلیلی جدید انجام شده است.

بدلیل آنکه تاثیر مودهای بالاتر به نیازهای لرزه ای به محتوای فرکانسی حرکت زمین و نوع سیستم سازه ای وابسته شده، این مقاله اولاً بر روی تاثیر مودهای بالاتر بر پاسخ های جابجایی بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی مطالعه کرده و سپس یک روش جدید برای محاسبه طرح بار جانبی و تغییر مکان هدف پیشنهاد می کند چهار روش تحلیلی که برای تخمین نیاز لرزه ای استفاده شده به شرح زیر می باشد:

۱- تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی ۲- روش (TLP) ۳- روش تحلیل بار افزون مودی (MPA) ۴- روش پیشنهادی در این مقاله .

۱- استادیار دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان

روش تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی به عنوان یک روش دقیق در نظر گرفته شده است و نتایج روشهای دیگر با این روش مقایسه شده است. و از برنامه DRAIN-2D نیز برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیر خطی استفاده شده است.

مشارکت مدهای بالاتر در پاسخ تغییر شکل الاستیک

قابهای خمشی ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه بر اساس آئین نامه های لرزه ای طراحی شده اند. طراحی قاب ها بوسیله برنامه SAP ۲۰۰۰ انجام گرفته و به منظور تحلیل مشارکت مدهای بالاتر در پاسخ تغییر شکل، ۱۳ رکورد افقی از زلزله چی چی تایوان (Chi-Chi) انتخاب شده و برای طراحی قاب به کار گرفته شده است. به طور کلی ۶۵ دسته حرکت سازه ای از تحلیل تاریخچه زمانی الاستیک بدست آمده که رئوس مطالب این تحلیل ها به صورت زیر می باشد:

۱. بوسیله یکی از پنج قاب طراحی شده و یکی از سیزده رکورد افقی $\ddot{u}_g(t)$ ، معادله حاکم بر حرکت به صورت زیر خواهد بود.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که u بردار تغییر مکان سقف نسبت به زمین می باشد. k, c, m جرم، میرایی کلاسیک و سختی جانبی سیستم می باشد و l تاثیر برداری ستونی که برای هر برابر واحد می باشد.

۲. معادله فوق می تواند به صورت عددی حل شود و از آن $u(t)$ را بدست آورد و همچنین یک بردار ثابت u از $u(t)$ در لحظه ای که تغییر مکان بام به ماکزیمم مقدار الاستیک می رسد، انتخاب نمود.

که در آن ϕ_i ، $\dot{\phi}_i$ ، $\ddot{\phi}_i$ مین ارتعاش طبیعی سازه می باشد.

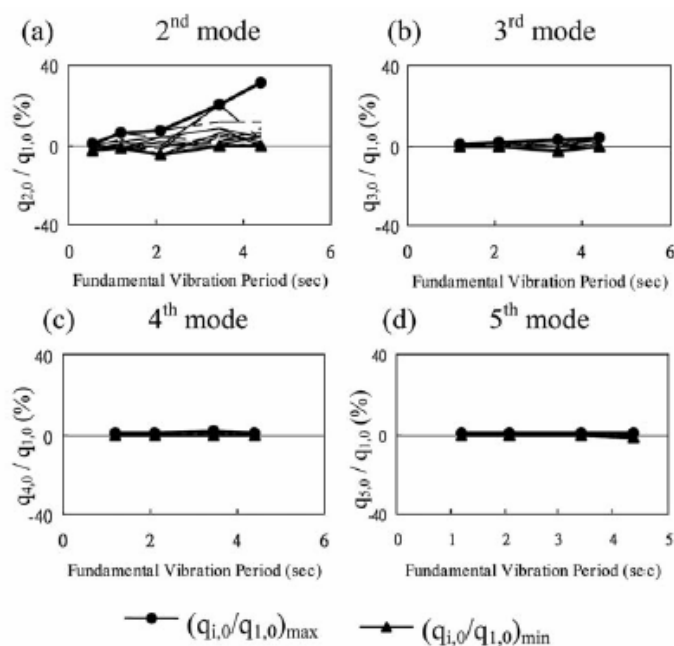
۳. مختصات مودال $q_{i,0}$ از u می توان بدست آورد که به صورت زیر می باشد. که در آن q_i ، \dot{q}_i ، \ddot{q}_i مین ارتعاش طبیعی سازه می باشد.

$$q_{i,0} = \frac{\phi_i^T m u_0}{\phi_i^T m \phi_i} \quad (2)$$

ϕ_i ، $\dot{\phi}_i$ ، $\ddot{\phi}_i$ مین ارتعاش طبیعی سازه می باشد.

از مراحل ۱ تا ۳، مشارکت پاسخ جابجایی مدهای بالاتر در مقایسه مود اساسی را می توان به صورت نسبت $q_{i,0}/q_{1,0}$ بیان کرد.

در شکل ۱ نسبت بدست آمده برای چهار مود اول بر اساس تابعی از پرپود طبیعی را نشان می دهد. از پوش منحنی های نسبتهای مشارکتی، می توان مشاهده نمود که دو مود اول پاسخ تغییر مکانی را بیان می کند و مود سوم و بالاتر نقش کمتری دارند. بنابراین در ادامه در روش پیشنهادی برای تحلیل بارافزون فقط اثر دو مود اول در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- سهم مشارکت مدهای بالاتر در مد اول

روش تحلیل پوش آور کران بالای پیشنهادی

مراحل اساسی روش تحلیل پوش آور پیشنهادی به صورت زیر می باشد:

۱. سازه ای را انتخاب کرده و ویژگیهای طبیعی آن مانند فرکانس طبیعی و شکل های مودی آن را محاسبه می کنیم. همچنین مودها را نرمال کرده به طوری که تغییر مکان بام واحد باشد.

۲. از طیف پاسخ الاستیک زلزله انتخاب شده برای محاسبه نسبت مشارکت کران بالای دو مود اول $(q_2/q_1)_{UB}$ که به صورت زیر می باشد استفاده می شود:

$$\left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB} = \frac{\Gamma_2 D_2}{\Gamma_1 D_1} \quad (3)$$

Γ_n : فاکتور مشارکت مودال Dn: پاسخ تغییر مکان الاستیک بدست آمده از طیف پاسخ

۳. بردار توزیع بارهای جانبی در ارتفاع ساختمان از فرمول زیر:

$$\mathbf{f}_{s,UB} = \omega_1^2 \mathbf{m} \phi_1 + \omega_2^2 \mathbf{m} \phi_2 \cdot \left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB} \quad (4)$$

ω_n : فرکانس طبیعی مورد n ام

۴. با استفاده از رابطه زیر مقدار تغییر مکان بام محاسبه می شود:

$$u_{r,UB} = u_{r,TLP} \left[1 + \left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB} \right] \quad (5)$$

$u_{r,TLP}$: مقدار تغییر مکان پیش بینی شده بوسیله روش TLP

۵. برای محاسبه پاسخ های لرزه ای یک سازه مفروض از یک تحلیل استاتیکی غیر خطی که تحت بار جانبی با الگوی بارگذاری $f_{s,UB}$ قرار گرفته استفاده می شود و بار جانبی فوق به صورت تدریجی افزایش می یابد تا به تغییر مکان هدف $u_{r,UB}$ در تراز بام برسد.

مثال های عددی

برای اهداف مقایسه ای، مدل سازی هایی برای روش های MPA, TLP, NL-RHA و روش پیشنهادی انجام شد. سازه های نشان داده شده در اولین ستون جدول ۱ بر اساس آئین نامه زلزله تایوان طراحی می شود. زلزله های انتخابی در ستون سوم دارای اثر مود دوم قابل توجهی بر سازه انتخاب شده در ردیف مشابه آن می باشد. داده های زلزله برای یک PGA داده شده که در جدول دیده می شود، وقتی که یکی از مفاصل پلاستیک در روش NL-RHA به ۱۵٪ می رسد، مقیاس می شود. در روش MPA، سه مود اول مورد تحلیل قرار گرفته و به صورت SRSS ترکیب می شوند.

No. of stories	T_1 (s)	Earthquake stations	PGA (g)	q_2/q_1 [Eq.(3)]
2-storey	0.559	TCU076	0.663	2.02%
5-storey	1.216	TCU076	0.51	6.03%
10-storey	2.077	TCU076	0.43	11.13%
20-storey	3.425	CHY046	0.439	19.87%
30-storey	4.393	TCU067	0.4	29.72%

جدول ۱- داده های پنج مورد تحلیل شده

نتایج عددی در شکل های ۲ تا ۶ نشان داده شده است. برای نمونه، شکل (a,b) ۲ بیشترین مقدار جابجایی بام و نسبت جابجایی نسبی را به ترتیب نشان می دهد. و بیضی ها در شکل ۲ محل چرخش های مفاصل پلاستیک را نشان می دهد که اندازه هر بیضی مقدار چرخش مفاصل پلاستیک را معرفی می کند که در هر طرف قاب نشان داده شده است. مقادیر بزرگترین چرخش های مفاصل پلاستیک در طرفین مفاصل نوشته شده است و در جدول ۲ نشان داده شده است. پنج چرخش حداکثر مفصل پلاستیک هر ساختمان بوسیله روش های متفاوت تخمین زده می شود که در جدول ۲ مشخص شده است. بعد از تخمین نیازهای تغییر مکانی بام، نتایج جالب زیر حاصل شد:

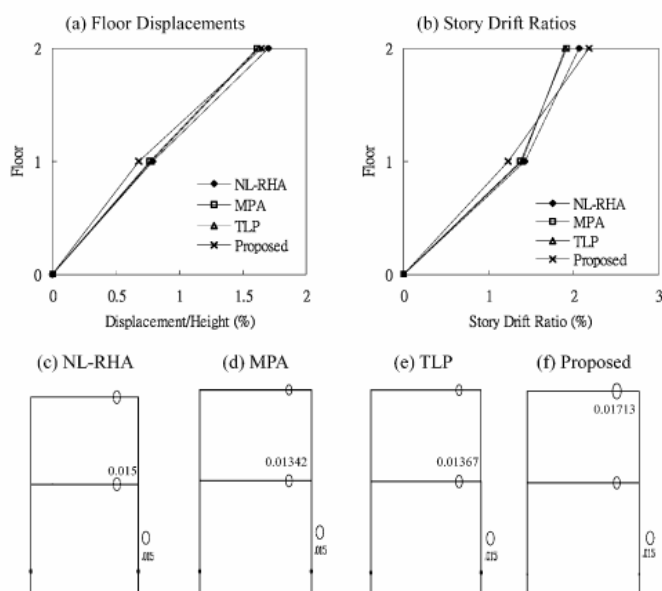
۱. برای ساختمانهای دو طبقه و پنج طبقه که در آن تاثیر مود دوم زیاد مهم نمی باشد، هر دو روش TLP و MPA، تغییر مکان بام را بهتر از روش پیشنهادی پیش بینی می کنند. هر چند در ساختمان دو طبقه، مقدار تغییر مکان طبقه دوم توسط روش پیشنهادی بهتر از روش TLP و MPA می باشد. روش کران بالا برای ساختمان پنج طبقه ضریب مشارکتی مود دوم را بالا دست در نظر می گیرد و بنابراین مقدار تغییر مکان طبقه سوم را دست کمتر و مقدار تغییر مکان طبقه پنجم را بیشتر محاسبه می نماید. در حالی که روش TLP و MPA مقادیر تغییر مکان قابل قبولی در مقایسه با روش NL-RHA پیش بینی می کند.

۲. روش TLP و MPA در ساختمان ۱۰ طبقه مقدار تغییر مکان طبقه ای را برای طبقات پائین، بیشتر و برای طبقات بالا، کمتر محاسبه می کند. در حالی که روش پیشنهادی بر عکس مقادیر فوق می باشد.

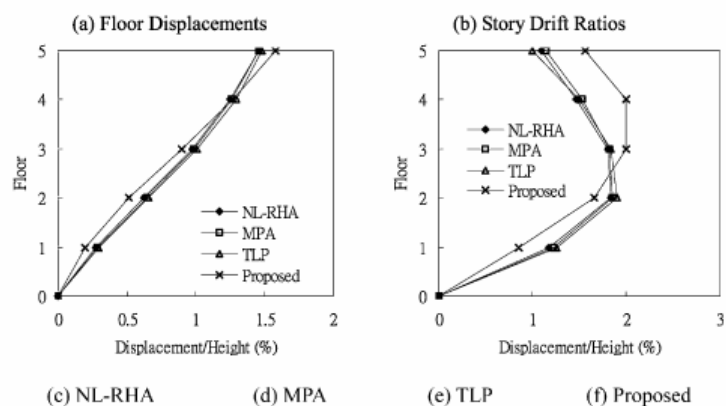
Building	NL-RHA	MPA	TLP	Proposed
2-story	0.01500 (B-1-R)	0.01342 (B-1-R)	0.01367 (B-1-R)	0.01713 (B-2-R)
	0.01467 (B-2-R)	0.01151 (B-2-R)	0.01204 (B-2-R)	0.01328 (B-1-R)
	0.00498 (RC-1-b)	0.00451 (RC-1-b)	0.00458 (RC-1-b)	0.00200 (RC-1-b)
	0.00493 (LC-1-b)	0.00441 (LC-1-b)	0.00448 (LC-1-b)	0.00182 (LC-1-b)
5-story	0.00126 (B-1-L)	0.00000	0.00000	0.00000
	0.01500 (B-2-L)	0.01387 (B-2-R)	0.01391 (B-2-R)	0.01467 (B-3-R)
	0.01233 (B-3-R)	0.01191 (B-1-R)	0.01172 (B-1-R)	0.01364 (B-4-R)
	0.01216 (B-4-R)	0.01063 (B-3-R)	0.01146 (B-3-R)	0.01348 (B-2-R)
10-story	0.01184 (B-1-L)	0.00480 (B-3-R)	0.00660 (B-3-R)	0.00742 (B-1-R)
	0.01114 (B-3-L)	0.00267 (RC-1-b)	0.00255 (B-3-L)	0.00434 (B-5-R)
	0.01483 (B-6-R)	0.01419 (B-4-R)	0.01312 (B-4-R)	0.01747 (B-6-R)
	0.01418 (B-5-R)	0.01285 (B-3-R)	0.01182 (B-3-R)	0.01656 (B-7-R)
20-story	0.01376 (B-4-R)	0.01213 (B-5-R)	0.01135 (B-5-R)	0.01376 (B-8-R)
	0.01239 (B-7-R)	0.01023 (B-2-R)	0.00949 (B-2-R)	0.01366 (B-5-R)
	0.01108 (B-3-R)	0.00954 (B-6-R)	0.00916 (B-6-R)	0.00946 (B-4-R)
	0.01500 (B-14-R)	0.00145 (B-4-R)	0.00091 (B-4-R)	0.01696 (B-15-R)
30-story	0.01442 (B-13-R)	0.00140 (B-5-R)	0.00072 (B-5-R)	0.01680 (B-16-R)
	0.01417 (B-15-R)	0.00129 (B-11-R)	0.00050 (B-3-R)	0.01422 (B-14-R)
	0.01355 (B-16-R)	0.00120 (B-9-R)	0.00018 (B-6-R)	0.01350 (B-17-R)
	0.01150 (B-17-R)	0.00112 (B-10-R)	0.00014 (B-9-R)	0.01099 (B-13-R)
30-story	0.01500 (B-24-R)	0.00000	0.00000	0.01563 (B-24-R)
	0.01465 (B-25-R)	0.00000	0.00000	0.01553 (B-25-R)
	0.01395 (B-23-R)	0.00000	0.00000	0.01441 (B-23-R)
	0.01181 (B-26-R)	0.00000	0.00000	0.01326 (B-26-R)
	0.01025 (B-22-R)	0.00000	0.00000	0.01035 (B-22-R)

جدول ۲- بزرگی و محل دوران مفصل پلاستیک

۳. برای ساختمانهای ۲۰ و ۳۰ طبقه که در آنها تاثیر مود دوم مهم می باشد، روش پیشنهادی از روشهای MPA و TLP بهتر می باشد. برای ساختمانهای ۲۰ طبقه مقدار تغییر مکان بام هنوز پائین می باشد ولی خطا نسبت به روش TLP و MPA کم می باشد. اگر مشارکت مود خطی از تغییر شکل کلی کم شود تاثیر مود دوم آشکار می شود. برای ساختمانهای ۳۰ طبقه مقدار تغییر مکان تخمین زده شده با روش پیشنهادی، کاملاً بر تحلیل NL-RHA منطبق است، در حالی که روش های دیگر دارای خطای زیادی می باشند.



شکل ۲- مقدار ماکزیمم جابجایی طبقات و دوران مفصل های پلاستیک در یک ساختمان ۲ طبقه



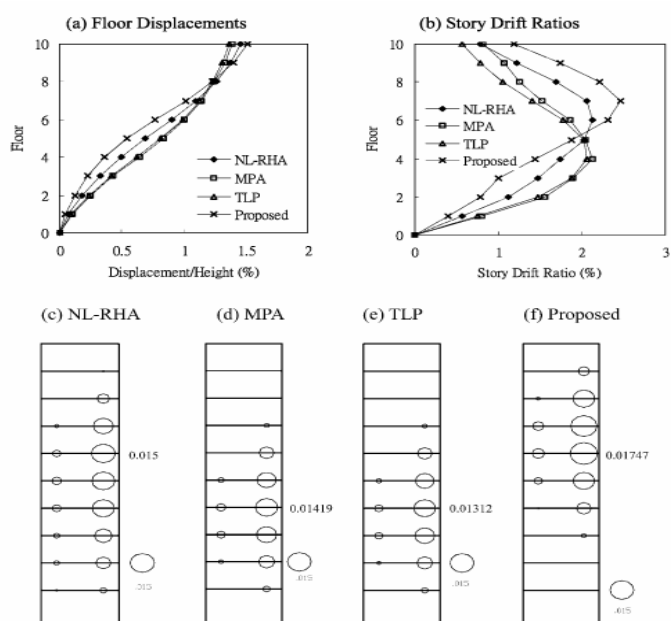
شکل ۳- مقدار ماکزیمم جابجایی طبقات و دوران مفصل های پلاستیک در یک ساختمان ۵ طبقه

بعد از محاسبه تغییر مکان نسبی ویژگی های زیر مشاهده گردید:

۱. در ساختمان دو طبقه مقدار تغییر مکان نسبی طبقه اول با دقت خوب و در طبقه دوم بیشتر تخمین زده شد (روش TLP و MPA) در حالیکه روش پیشنهادی در طبقه دوم عدد بزرگتر و در طبقه اول عدد کوچکتری را محاسبه می نماید.

۲. برای ساختمانهای پنج طبقه روش MPA و TLP دارای دقت بالایی، نسبت به روش پیشنهادی می باشند.

۳. برای ساختمانهای ۱۰ طبقه روش های MPA و TLP در طبقات پائین، مقدار نسبت فوق را بزرگتر و در طبقات بالا، مقدار نسبت را کوچکتر تخمین می زند. در حالی که روش پیشنهادی کاملاً برعکس می باشد. ولی روش MPA دارای تخمین خوبی در طبقات بالا می باشد.



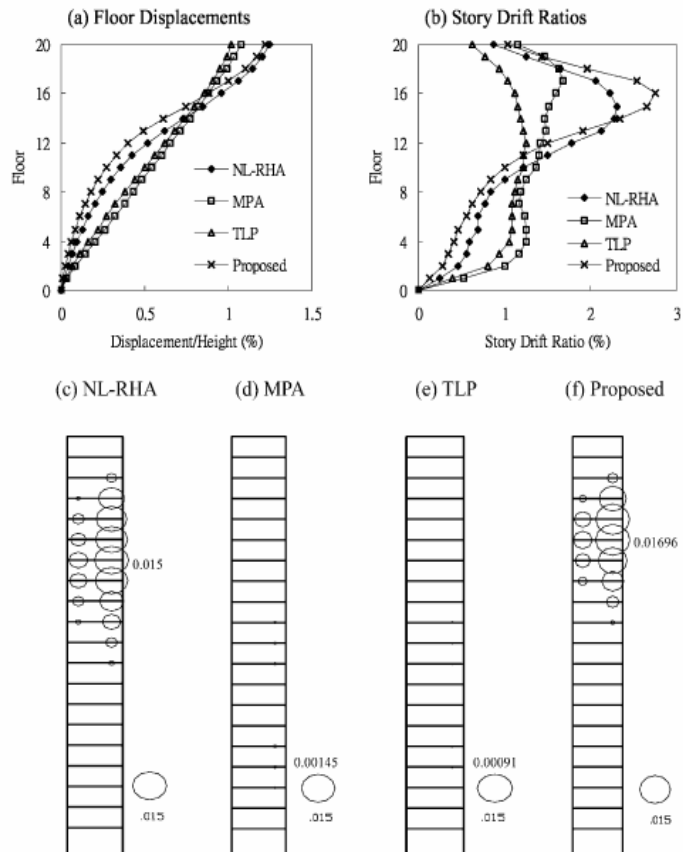
شکل ۴- مقدار ماکزیمم جابجایی طبقات و دوران مفصل های پلاستیک در یک ساختمان ۱۰ طبقه

۴. برای ساختمان ۲۰ طبقه روش پیشنهادی مقدار تغییر مکان نسبی را از روش MPA و TLP بهتر تخمین می زند. اگرچه روش پیشنهادی در طبقات پائین مقدار نسبت را کوچکتر و در طبقات بالا مقدار نسبت را بزرگتر تخمین می زند، ولی مقدار خطای این روش کم می باشد. برای ساختمان ۳۰ طبقه روش پیشنهادی مقدار تغییر مکان نسبی را بسیار بهتر از روشهای MPA و TLP محاسبه می کند.

در ارزیابی مقدار چرخش مفصل نتایج زیر مشاهده گردید:

۱. برای ساختمان دو طبقه تمام روشها، مقدار چرخش مفصل پلاستیک را به خوبی پیش بینی می کنند.

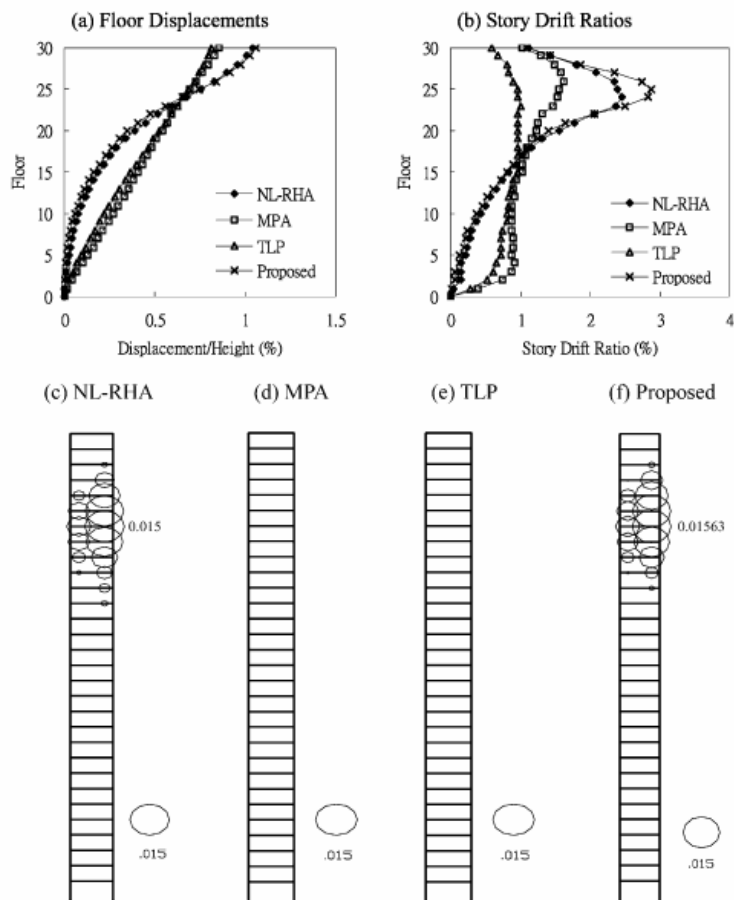
۲. برای ساختمان ۵ طبقه تمام روشها مقدار چرخش مفصل پلاستیک را بسیار کمتر از روش NL-RHA پیش بینی می کنند.



شکل ۵- مقدار ماکزیمم جابجایی طبقات و دوران مفصل های پلاستیک در یک ساختمان ۲۰ طبقه

۳. در جدول ۲ برای شکل‌های (c-f) در مقایسه بین روش NL-RHA و روش‌های MPA و TLP، محل چرخش مفصل پلاستیک را شبیه هم پیش بینی می کند ولی با اندکی اختلاف، در حالی که روش پیشنهادی در طبقات بالا مقدار بیشتری و در طبقات پائین مقدار کمتری نسبت به NL-RHA در ساختمان ۱۰ طبقه تخمین می زند.

۴. برای ساختمان های ۲۰ و ۳۰ طبقه تنها روش پیشنهادی محل و مقدار چرخش مفصل پلاستیک را با دقت معقول تخمین می زند. چرخش مفصل کمتری به وسیله روش MPA و TLP تخمین زده می شود.



شکل ۶- مقدار ماکزیمم جابجایی طبقات و دوران مفصل های پلاستیک در یک ساختمان ۳۰ طبقه

از شکل (a) ۶ می توان مشاهده نمود که مقدار خطا برای تمام روشها در ساختمان کمتر از ۱۰ طبقه قابل قبول می باشد ولی برای ساختمانهای بالاتر از ۱۰ طبقه (از آنجایی که مقدار خطای روش MPA و TLP بزرگ می باشد) فقط روش پیشنهادی دارای محدوده قابل قبولی می باشد. از شکل (a) ۶ می توان مشاهده نمود که خطای روشهای MPA و TLP برای ساختمانهای بالاتر از ۱۰ طبقه مقدار ناچیزی می باشد، ولی این خطاها برای ساختمانهای بالاتر از ۱۰ طبقه غیر قابل قبول می باشد. در حالی که خطای بدست آمده از روش پیشنهادی زیاد مهم نمی باشد و در حدود ۱۶٪ می باشد. در واقع از شکل (a-b) ۶ می توان این طور استنباط کرد که در ارزیابی نیازهای لرزه ای روش های MPA و TLP دارای دقت کافی در ساختمان پائین تر از ۱۰ طبقه می باشند. و روش پیشنهادی دارای تاثیر بیشتری در ساختمان بیشتر از ۱۰ طبقه می باشند.

نتایج

یک روش تحلیل بار افزون ساده شده که مودهای بالاتر را در نظر می گیرد، برای ارزیابی پاسخهای لرزه ای قاب های مسطح ساختمان با عنوان روش کران بالا پیشنهاد شده است. این روش می تواند برای ارزیابی در طراحی های موجود کاربرد داشته باشد. در این مطالعه نسبت مشارکت پاسخ تغییر مکانی الاستیک مودهای بالاتر در مقایسه با مود اول، از مدل کردن ۵ ساختمان طراحی شده که به طور کامل ۱۳ حرکت قوی زمین لرزه تولید شده توسط رکوردهای ثبت شده در زلزله چی چی تایوان قرار گرفتند، بدست آمده است. نتایج نشان داد که تاثیر مود دوم در یک روش خطی تقریبی با افزایش ارتفاع افزایش می یابد و تاثیر مودهای بالاتر کمتر می باشد. مدل سازی های عددی زیادی به منظور ارزیابی تغییر مکان بام تغییر مکان نسبی و چرخش مفصل پلاستیک انجام شد. با استفاده از روش های NL-RHA و TLP و روش پیشنهادی در این مقاله، برای ساختمانی که از قبل طراحی شده و مودهای بالاتر تاثیر قابل توجهی در ویژگیهای آنها دارد، مقادیر نیازهای بدست آمد. از مقایسه کامل نتایج زیر حاصل شد:

۱. برای ساختمان های ۲ طبقه و ۵ طبقه روشهای MPA و TLP بهتر از روش پیشنهادی پاسخ های غیر خطی را پیش بینی می کنند.
۲. برای ساختمانهای ۱۰ طبقه روشهای MPA و TLP، دارای پاسخ های غیر خطی بزرگتری در طبقات پائین و در طبقات بالا دارای پاسخ های کوچکتری می باشند در حالی که روش پیشنهادی کاملاً بر عکس می باشد.

۳. برای ساختمانهای ۲۰ و ۳۰ طبقه که در آنها اثر مود های بالاتر در پاسخهای دینامیکی مهم می باشد، فقط روش پیشنهادی می تواند به طور معقول مقدار پاسخهای غیر خطی یا نیاز های لرزه ای ساختمان را پیش بینی می کند. اگرچه روش MPA در طبقات بالاتر مقدار جابجایی نسبی طبقات را به خوبی تخمین می زند.

۴. باید به این نکته توجه داشته باشیم که روش پیشنهادی، میل به پاسخ لرزه ای بزرگتر در طبقات بالاتر و پاسخ لرزه ای کوچکتر در طبقات پائین دارد. در حالی که روش TLP کاملاً برعکس می باشد. بنابراین در بیان نیاز لرزه ای به وسیله روش TLP و روش پیشنهادی بهتر است که ماکزیمم پاسخها به صورت قدر مطلق بیان شود.

مراجع

[۱] Tysh Shang Jan, Ming Wei Liu, Ying Chieh Kao, An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings, Engineering Structures ۲۶ (۲۰۰۴)

[۲] Chopra AK, Goel RK. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake Engng Struct Dynam (۲۰۰۲);

[۳] Chopra AK. Dynamic of structures: theory and applications to earthquake engineering